N° D'ORDRE
119

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS-SCIENCES

PAR

Mlle Marguerite CHOPINET

PREMIÈRE THÈSE

Contribution à l'étude des nébuleuses planétaires grâce à la Caméra Électronique

DEUXIÈME THÈSE

Les limites de la spectographie stellaire ; les faibles dispersions

Soutenues le 27 Mai 1963 devant la Commission d'examen

MM. SEMIROT — Président
ROUSSET
SERVANT
FERHENBACH — Examinateurs
LALLEMAND

N° D'ORDRE
119

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS-SCIENCES

PAR

Mlle Marguerite CHOPINET

PREMIÈRE THÈSE

Contribution à l'étude des nébuleuses planétaires grâce à la Caméra Électronique

DEUXIÈME THÈSE

Les limites de la spectographie stellaire ; les faibles dispersions

Soutenues le 27 Mai 1963 devant la Commission d'examen

MM. SEMIROT		Président
ROUSSET	}	Examinateurs
SERVANT		
FERHENBACH		
LALLEMAND		

UNIVERSITÉ DE BORDEAUX – FACULTÉ DES SCIENCES

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

Doyen

M. BRUS

Doyen Honoraire

M. CHAINE

Professeurs Honoraires

MM.	DAURE	Recteur de l'Académie de Caen	MM.	QUELET	Professeur à la Sorbonne
	CHAINE			PISOT	Professeur à la Sorbonne
	KASTLER	Professeur à la Sorbonne	Mlle	JOSIEN	Professeur à la Sorbonne

Professeurs

	DANGEARD	Botanique		GUIZONNIER	Physique
	GENEVOIS	Chimie biologique et Physiol. végétale		DIEUZEIDE	
				HAGET	Zoologie expérimentale
	MILLOUX	Calcul infinitésimal		SEMIROT	Astronomie
	CAU	Physique expérimentale		CHASTEL	Physique nucléaire
	BRUS	Chimie		HAGENMULLER	Chimie minérale
	AVEL	Zoologie et Physiologie animale		ALLARD	Chimie
	ROUSSET	Physique générale		CREAC'H	Biologie animale SPCN
	ROGER	Mécanique rationnelle		LOUDETTE	Mécanique physique
	WEILL	Anatomie comparée et embryogénie		PATY	Chimie
				BORDES	Préhistoire
	DUFRESNOY	Mathématiques générales		SECHET	Botanique
	LAFON	Physiologie générale		LAFARGUE	Physique (C.S.U. de Pau)
	BOUNHIOL	Biologie animale		BAGANAS	Mathématiques
	SERVANT	Physique		VALENTIN	Radioélectricité
	CALAS	Chimie organique		HOARAU	Chimie physique
	GAY	Minéralogie		LALANDE	Chimie appliquée
	LAMAIRE	Géologie		ENNOUCHI	Géologie (détaché à la Faculté des Sciences du Maroc)
	PACAULT	Chimie physique			
	SCHOELLER	Géologie		MAURET	Chimie organique (C.S.U. de Pau)
	DAVID	Biologie végétale			
	COLMEZ	Méthodes mathématiques de la Physique		EYME	Botanique
				FRAINNET	Chimie organique
	CAMBAR	Biologie animale		RUAMPS	Physique électronique
	VIGNEAUX	Géologie		DESCHAMPS	Chimie (détaché à la Faculté des Sciences du Maroc)
	PANOUSE	Zoologie (détaché à la Faculté des Sciences du Maroc)		MARCHAND	Chimie
	ARZELIES	Physique (détaché à la Faculté des Sciences du Maroc)	Mme	TISON	Calcul des probabilités
				GOTTIS	Géologie approfondie
	RIBEREAU-GAYON	Oénologie et chimie agricole		LEMANCEAU	Chimie
	RISS	Mathématiques (détaché à l'Institut Français au Maroc)		CLASTRE	Cristallographie physique
				BLONDEL	Mathématiques

Maitres de conférences honoraires

M. DE PUYMALY

Maîtres de conférences

	SOURISSEAU	Chimie MPC-SPCN	MM.	BOTHOREL	Chimie
	PEREZ Y JOBAR	Physique théorique		CARDO	Psychophysiologie
	JOUSSOT-DUBIEN	Chimie MPC-SPCN		BERTHE	Mathématiques (C.S.U. de Pau)
Mlle	FAURE-MURET	Géologie (détachée à la Faculté des Sciences de Rabat)		CLIN	Géologie
				BONNEVAY	Physique théorique
Mlle	LAFFITTE	Physique MGP		SIMONOFF	Chimie physique
	LOCHET	Physique		CHARRU	Physique MPC
	ROCH	Physique		DUBOIS	Physique (C.S.U. de Pau)
	VALADE	Chimie organique		BONASTRE	Chimie (C.S.U. de Pau)
	VINDT	Biologie végétale		LASCOMBE	Chimie
	REGNIER	Mathématiques		RIMPAULT	Mathématiques
	PETIT	Physique corpusculaire		N	Mathématiques
	DESTRIAN	Chimie M.P.C.		MAYER	Physique (C.S.U. de Pau)
	BARAUD	Chimie biologique			

Secrétaire Principal

M. ARTIGUELONG

SOMMAIRE

L'utilisation de la camera électronique derrière un spectrographe à réseau placé au foyer Newton du télescope de 120 cm de l'Observatoire de Haute-Provence a permis d'apporter de nouvelles données relatives à la connaissance des nébuleuses planétaires.

1) De nombreuses raies en émission ont été identifiées dans 19 objets ; la classification spectrale de plusieurs noyaux a pu être précisée.

2) Après correction de l'aberration de distorsion, due à l'optique électronique électrostatique, des mesures de vitesses radiales de ces nébuleuses ont été effectuées sur 74 clichés et comparées à celles faites sur une soixantaine de spectres obtenus par photographie ordinaire. Les résultats sont concordants et permettent d'obtenir les coordonnées de l'apex, la valeur de la constante de Oort A et la longitude du centre galactique.

3) Une méthode de dépouillement spectrophotométrique des clichés conduit à de nombreuses déterminations d'intensités de raies nébulaires. Compte-tenu du rougissement interstellaire, déduit des intensités hors atmosphère des raies de Balmer, on a pu déterminer l'abondance d'helium dans la nébuleuse, parfois calculé sa température électronique et confronté les théories avec les observations. Pour 3 nébuleuses de grandes dimensions apparentes, différentes régions ont été étudiées. La proportion d'helium ionisé est en relation très nette avec la différence des magnitudes de l'étoile centrale et de la nébuleuse, pour les nébuleuses à forte excitation.

INTRODUCTION

En 1955, l'utilisation à l'Observatoire de Haute-Provence de la caméra électronique à des observations spectrographiques était décidée. A cet effet, un spectrographe destiné à équiper le télescope de 120 cm fût construit et, dès le mois de mai 1956, MM. Lallemand, Fehrenbach, Duchesne et moi-même procédions aux premiers essais sur le ciel. Nous avons évidemment rencontré de multiples difficultés dans la mise au point de cette nouvelle technique d'observation. Alors qu'en octobre de la même année, nous obtenions les premiers spectres dignes de ce nom sur la nébuleuse d'Orion, nous constations que ces spectres étaient parfois dédoublés, très probablement sous l'effet des variations de champ magnétique qui résultaient du déplacement de grosses masses métalliques dans la coupole : dôme, escalier, etc.. Des mesures de champ magnétique furent alors faites par Monsieur le Professeur Néel et son équipe : elles confirmèrent notre hypothèse. Il fallu attendre plus d'un an avant de pouvoir entreprendre des observations dans de bonnes conditions, les effets nocifs constatés étant alors rendus inappréciables par un blindage en μ métal.

Au printemps 1958, nous décidions d'inclure dans notre programme de travail la spectrographie des nébuleuses planétaires et de leurs noyaux. En effet, ces objets étant à quelques exceptions près peu ou mal connus, nécessitent de puissants moyens d'observation, à cause de leurs luminosités généralement très faibles.

De nombreuses difficultés techniques nous attendaient encore. A celles-ci s'ajoutait celle d'obtenir un matériel suffisant, entièrement réalisé au Laboratoire de Physique Astronomique de l'Observatoire de Paris, qui se heurtait à des problèmes vitaux : personnel et locaux insuffisants pour la construction des tubes et la fabrication des photocathodes. Mais les résultats obtenus malgré tout étaient encourageants, et un peu de beau temps durant ces dernières années plutôt mauvaises du point de vue météorologique, beaucoup de ténacité et de patience de la part de l'Equipe toute entière nous permirent d'effectuer les observations nécessaires à ce travail.

Son but est double :

1) Rendre compte des nouveaux procédés de dépouillement nécessités par les clichés ainsi obtenus,

2) Les appliquer à l'avancement de la connaissance des nébuleuses planétaires.

Un premier chapitre traitera du matériel d'observation.

Le deuxième chapitre montrera l'apport nouveau qualitatif que fournissent les clichés pris avec la caméra électronique.

Le troisième donnera la méthode de réduction et les résultats obtenus, du point de vue des vitesses radiales.

Dans le quatrième chapitre, nous exposerons les procédés de réduction utilisés et les résultats des mesures spectrophotométriques globales effectuées sur quelques nébuleuses planétaires. Les nébuleuses NGC 650-1, NGC 6720 et NGC 7008 seront étudiées plus en détail.

CHAPITRE I

MATÉRIEL D'OBSERVATION

L'étude des nébuleuses planétaires que nous avons entreprise repose :

1) Sur des spectres obtenus avec différents instruments par les procédés photographiques ordinaires,

2) Sur des spectres obtenus à l'aide de la caméra électronique.

Nous allons passer rapidement en revue le matériel instrumental utilisant la photographie courante pour nous arrêter plus longuement ensuite sur celui utilisant un procédé nouveau : la photographie électronique. Tous les clichés ont été pris à l'Observatoire de Haute-Provence.

A. SPECTROGRAPHIE ORDINAIRE -

Pour pouvoir contrôler les premiers résultats obtenus avec la camera électronique, de nombreux clichés ont été pris avec les différents spectrographes de l'Observatoire de Haute-Provence.

1. Grand spectrographe.

Le spectrographe installé au foyer coudé du télescope de 193 cm a été décrit par Ch. Fehrenbach [1]. Nous ne reviendrons donc pas sur cet instrument. Signalons seulement que les chambres photographiques utilisées sont les chambres I et III, selon les luminosités des nébuleuses étudiées.

2. Spectrographe E.

Il a été réalisé à l'Observatoire de Haute-Provence, pour équiper le télescope de 120 cm. C'est derrière cet ensemble instrumental que la camera électronique a été placée. Mais, chaque fois que l'utilisation en était impossible, nous nous sommes servis de ce spectrographe avec des plaques photographiques Kodak 103 aF. De nombreux spectres ont été pris, qui nous ont permis de vérifier les résultats obtenus par ailleurs.

La fente du collimateur est placée au foyer Newton du télescope. L'ouverture numérique de ce collimateur F/6 correspond évidemment à celle du télescope. Le système dispersif est un réseau à échelettes de 300 traits par millimètre, fabriqué par la Société Bausch et Lomb, utilisé en dif-

fraction normale pour λ = 5200 A, l'angle d'incidence étant alors de 9°. L'objectif de chambre est un objectif Boyer ouvert à F/2,4 ; sa distance focale est de 12 cm. Sur la plaque photographique inclinée de 1°, 5 par rapport à l'axe optique de l'objectif, la définition est bonne à partir de H_ϵ jusqu'au delà de 6900 A, limite de sensibilité des plaques 103 aF. La dispersion du spectre est de 277 A/mm.

Le spectrographe peut tourner autour de l'axe du collimateur pour donner à la fente une direction quelconque. Pour tous nos clichés, la fente était orientée Est-Ouest. Un viseur de fente sert au guidage, tandis qu'à l'avant du spectrographe un miroir escamotable facilite l'identification de l'objet considéré et le choix de la région à étudier. A quelques rares exceptions près, les spectres ont été pris sans balayage de manière que chaque raie donne une bonne représentation de l'image monochromatique de la partie de la nébuleuse qui se projette en un point de la fente.

B. CAMERA ELECTRONIQUE -

La caméra électronique est d'abord un convertisseur d'image ; par effet photoélectrique, l'image lumineuse qui se forme sur la photocathode est transformée en une image électronique. Reprise par une optique électronique, cette image forme sur une plaque sensible aux électrons une reproduction fidèle de l'image lumineuse.

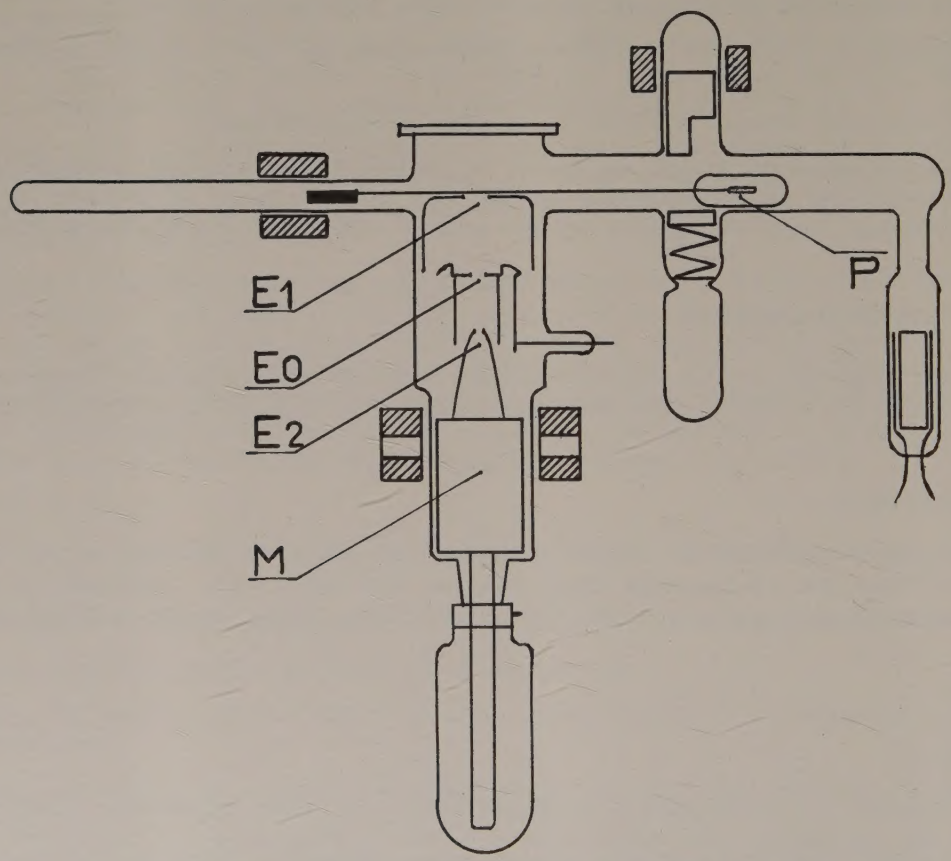


Figure 1 - Schéma de la caméra électronique.

1. Description.

Rappelons rapidement les caractéristiques du montage réalisé par le Laboratoire de Physique Astronomique de l'Observatoire de Paris et utilisé à l'Observatoire de Haute-Provence.

Un tube en verre pyrex, fermé par une plaque de verre de 4 mm d'épaisseur optiquement taillée, contient l'ensemble du système :

a) L'optique électronique est formée de trois diaphragmes E portés à des potentiels croissants. E_1 supporte la photocathode ; il est porté à un potentiel - V_1 kilovolts ; E_o est au potentiel 0 et E_2 à un potentiel positif + V_2 kilovolts.

b) Le magasin à plaques M contenant 8 plaques Ilford G 5 est un cylindre à pans coupés dont la rotation, comme la manoeuvre de l'obturateur, est commandée de l'extérieur à l'aide d'électro-aimants.

c) L'ampoule de verre scellée P contient la photocathode ; elle sera, au moment de l'utilisation de l'appareil, brisée contre le marteau et la cathode sera mise en place à l'aide de commandes magnétiques.

La complexité du procédé est dûe à des difficultés techniques. En effet, la couche photoélectrique Cs-Sb n'est stable que dans une enceinte où règne un très bon vide. Il faudra donc, avant la casse de l'ampoule qui permet la mise en place de la photocathode et l'utilisation de l'appareil, réaliser dans le tube un vide assez poussé, de l'ordre de 10^{-7} mm de Hg.

2. Préparation du tube.

L'appareil contenant l'ensemble du système est placé sur un bâti de pompage et mis en communication avec une pompe à diffusion d'huile. Un four permet d'étuver pendant plusieurs heures à une température d'environ 350°C la partie centrale du tube ; celui-ci est fermé par un joint d'apiezon W coulé autour de la plaque de verre supérieure. Puis, en continuant le pompage, on refroidit le magasin à plaques et le support de la cathode à l'aide de pièces métalliques plongeant dans des vases Dewar contenant de l'air liquide. Ce refroidissement a pour but d'éviter à la fois le dégazage des plaques à électrons et l'émission thermique de la photocathode. Un bon vide et un bon refroidissement sont indispensables pour conserver la couche photosensible pendant des heures, sans que son rendement quantique diminue de façon appréciable.

Pour parfaire le vide, après la fermeture du robinet qui réalise l'isolement de l'appareil, on évapore des getters de baryum au niveau du magasin à plaques et du support de la photocathode. Puis celle-ci est mise en place sur le diaphragme E_1. Le tube est prêt à être utilisé.

Une pompe ionique à titane a été, depuis quelques mois, adjointe au tube lui-même : elle permet de maintenir un excellent vide pendant la durée de l'observation alors que l'appareil est fixé sur le télescope et empêche, de ce fait, l'apparition d'une tache ionique sur les plaques photographiques. Cette tache que l'on remarquait souvent auparavant sur les clichés à temps de pose relativement longs (30-45 minutes) était dûe à l'ionisation des gaz résiduels par les électrons parasites circulant à l'intérieur du tube ; elle était centrée sur l'axe de l'optique électronique et diminuait considérablement le rapport signal/bruit au centre du cliché.

3. Mises au point optique et électronique.

a) Mise au point optique.

Après chaque expérience, le tube doit être ouvert pour renouveler le chargement du magasin à plaques ; l'optique électronique doît être démontée pour le nettoyage et la photocathode remplacée. De ce fait, la position de la photocathode peut subir de légères variations d'une expérience à l'autre ; de plus, l'épaisseur du ménisque ou celle des couronnes en acier Inox qui le supportent, peut différer également. Il est donc indispensable, étant donné l'ouverture du faisceau lumineux (F/2,4), de faire, avant chaque série de clichés, une mise au point soignée de la photocathode dans le plan focal de l'objectif du spectrographe. Un montage optique permet de réaliser facilement cette mise au foyer.

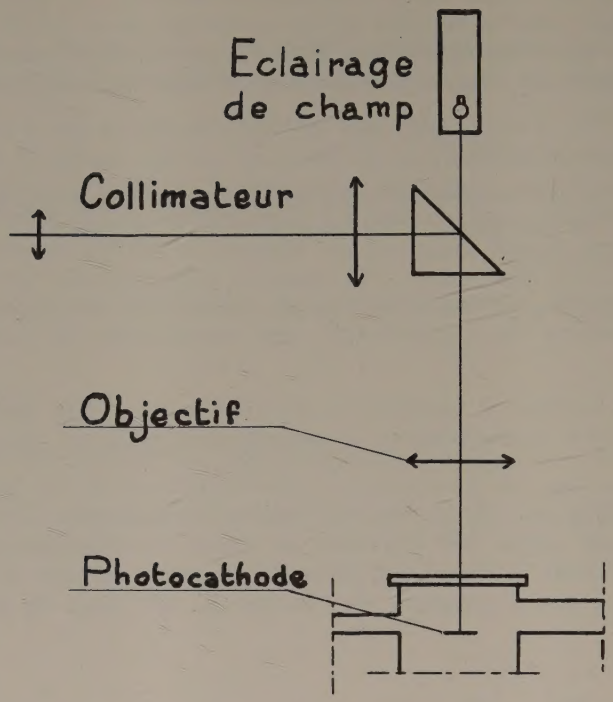


Figure 2 - Dispositif de mise au point optique.

Le spectrographe ayant été préalablement réglé, on sépare l'objectif de chambre et le porte-chassis photographique du reste de l'appareil ; l'ensemble est alors placé derrière un collimateur pratiquement réglé sur l'infini. L'image d'une plaque photographique est donc au point dans le plan focal de ce collimateur. Le contrôle étant ainsi effectué, le porte-chassis photographique est remplacé par une platine supportant la camera électronique. La mise au foyer de la photocathode se fait en visant un petit cercle dépoli sur la face inférieure du ménisque et en réglant le tirage de l'objectif de manière à observer une image nette de ce détail dans le plan du réticule du collimateur. C'est l'ensemble objectif-caméra électronique que l'on adapte ensuite derrière le spectrographe fixé au télescope.

b) Mise au point électronique.

Les caractéristiques de l'optique électronique dépendent de la forme et des dimensions des pièces qui la composent. Celles qui sont uniquement métalliques sont assez bien standardisées, mais la triple soudure (verre et métal) ne correspond qu'approximativement à la pièce calculée théoriquement. Les différences que présentent ces triples soudures rendent nécessaire la détermination de la mise au point électronique chaque fois que l'on change cette pièce.

C'est le rapport V_2/V_1 des potentiels utilisés qui détermine la distance focale de l'optique électronique électrostatique. Si celui-ci est constant, un changement de V_1 et V_2 produira seulement une variation de densité sur la plaque photographique pour une intensité de lumière donnée. La valeur optimum de ce rapport est déterminée expérimentalement par une série de clichés, comportant uniquement l'étalonnage Pd-Ne.

Les tensions utilisées sont voisines de :

$$V_1 = -9 \text{ kV} \quad \text{et} \quad V_2 = +18 \text{ kV}.$$

Elles sont produites par un appareil électrostatique de marque SAMES formé de deux générateurs HT indépendants. La nécessité de tensions très stables oblige à un contrôle précis et fidèle des tensions utilisées. Après avoir employé pour mesurer V_1 et V_2 des électromètres Everett Edgecombe à cadran, nous utilisons depuis juillet 1960 un système de repérage du rapport des tensions qui nous donne complète satisfaction. Cet appareil, conçu au Laboratoire d'électronique de l'Observatoire de Haute-Provence, repose sur le principe suivant :

Entre deux points A et B de la chaîne de résistances reliant les pôles + et - de la machine SAMES à la masse, est branché un potentiomètre. Les potentiels de ces points par rapport à la masse sont :

$$U_1 = k_1 V_1 \qquad U_2 = k_2 V_2$$

tels que : $U_2 \# - U_1 \# 30$ volts. Pour l'équilibre et pour des valeurs de R_1 et R_2 assez grandes, on a :

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{k_2 V_2}{k_1 V_1} = K \frac{V_2}{V_1}$$

Pour différentes valeurs choisies de R_2/R_1, on aura des valeurs différentes bien déterminées du rapport des tensions V_1 et V_2, à condition de faire varier l'une d'entre elles jusqu'à réaliser l'équilibre entre les deux points M et D du pont : cet équilibre est mis en évidence à l'aide du voltmètre électronique.

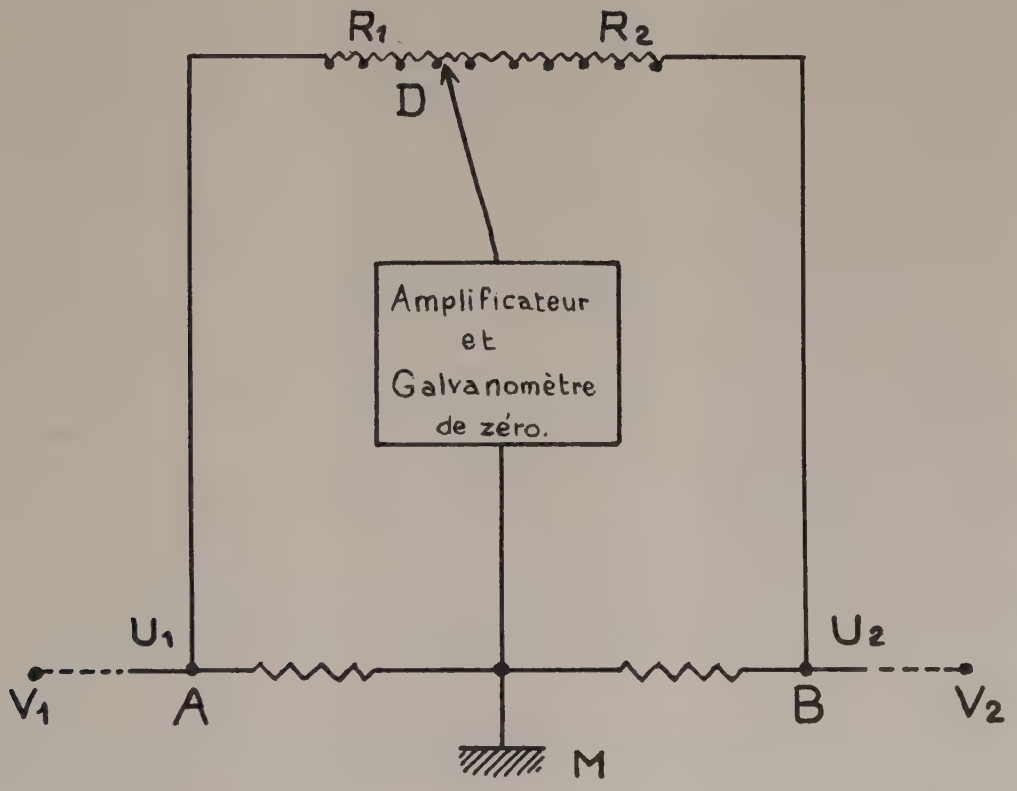


Figure 3 - Stabilisateur du rapport des tensions.

On a choisi des résistances R_2 et R_1 susceptibles de donner des rapports de tensions voisins de 2, ce qui est nécessaire à une bonne mise au point électronique avec les optiques actuelles. La gamme des rapports s'étend de 1,85 à 2,15 d'une manière continue. Une déviation de 1 division de l'appareil de mesure correspond à une variation de 5.10^{-4} du rapport des tensions, ce qui permet : 1) de conserver facilement ce rapport constant, à 10^{-4} près, pendant la durée des poses astronomiques, 2) de reproduire cette valeur, avec une précision largement suffisante à chaque manipulation. Il sera toutefois prudent de refaire une détermination de ce rapport au début de chaque série d'expériences, à cause des variations très lentes possibles des résistances.

4. Caractéristiques optiques de l'ensemble.

a) Grandissement.

Le grandissement de l'optique électronique que nous utilisons est de l'ordre de 0,75. Nous avons vu que la dispersion donnée par le spectrographe E était de 277 A/mm, c'est la dispersion dans le plan de la photocathode. Par conséquent, sur la plaque nucléaire, elle sera de 370 A/mm.

b) Résolution.

Nous avons constaté que sous l'effet des variations du champ magnétique à l'intérieur de la coupole, variations dues au déplacement du dôme, de la passerelle d'observation, du télescope, etc., la résolution de l'optique diminue très rapidement. Ceci nous a conduit à protéger tout le corps de la caméra électronique par un blindage en μ métal, calculé par L. Néel et M. Toitot. L'efficacité de ce dispositif annule totalement l'élargissement et même le dédoublement des raies spectrales, anomalies qui apparaissaient sur les premiers clichés obtenus avec l'appareil monté sur le télescope de 120cm.

c) Aberrations.

Il semble impossible de supprimer totalement les défauts des lentilles électroniques. En effet, si l'on peut imaginer une lentille fabriquée avec un verre d'indice variable $n = k\sqrt{V}$, analogue à une lentille électrostatique dans laquelle existe une certaine distribution du potentiel V, réciproquement, on ne peut pas réaliser une variation discontinue de ce potentiel, comme on le fait pour l'indice n en optique classique : l'équation de Laplace $\Delta V = 0$ l'interdit. Il faudra donc réduire par des artifices l'importance de ces aberrations ou si c'est impossible, en tenir compte.

La première solution a été appliquée au cas de la courbure de champ. L'image donnée par le spectrographe E sur la photocathode joue pour l'optique électronique le rôle d'objet. Or, il est apparu que la courbure de champ donnée par cette optique était très importante. On remédie à cet inconvénient en utilisant une cathode courbe : un ménisque biconcave dont les rayons de courbure sont respectivement égaux à 125 mm et 105 mm, supporte à sa partie inférieure la couche photosensible. La traversée de cette lentille par les rayons lumineux transforme l'image plane donnée par l'objectif du spectrographe en une image courbe s'appliquant au mieux sur cette couche. De cet objet, l'optique électronique donnera sur la plaque photographique une image électronique à peu près plane à une assez grande distance de l'axe.

Par contre, la distorsion, aberration également importante produite par l'optique électronique, ne pourra pas être corrigée ; on observe ici une distorsion positive, c'est-à-dire en coussinet, dont il faudra tenir compte dans les mesures de position des raies. Nous verrons ultérieurement comment elle s'introduit dans le calcul des vitesses radiales. Les autres aberrations géométriques semblent négligeables.

Dans une optique électronique, l'aberration chromatique peut provenir soit de la dispersion des vitesses initiales des électrons, soit des fluctuations de la tension, soit encore des pertes d'énergie des électrons pendant la traversée du support de l'objet. Dans la caméra électronique, ces 3 causes sont éliminées au mieux. Premièrement, dans un objectif à immersion comme celui-ci les charges électriques sont dès leur émission soumises au champ des lentilles ; deuxièmement, les fluctuations du rapport des tensions sont réduites à 0,01 % par le système décrit précédemment et enfin la couche sensible étant située à la partie inférieure du ménisque, les électrons n'ont pas à traverser l'objet. L'aberration chromatique est donc très petite ; nous la négligerons.

Restent les aberrations de charge d'espace : les densités de courant étant toujours très faibles à cause du peu de lumière tombant sur la cathode pendant les poses, elles sont négligeables.

Pour éviter que s'ajoutent à ces défauts des aberrations de décentrage dont il faudrait tenir compte, il est indispensable que les différentes pièces de l'optique électronique soient parfaitement centrées les unes sur les autres et qu'il n'existe pas de décentrement important des bagues métalliques de la triple soudure.

5. Avantage de ce mode d'observation.

Malgré la durée relativement longue de la préparation d'une expérience (au minimum 7 heures sans compter la remise en état du tube et de l'optique), l'utilisation de la caméra électronique présente de gros avantages dûs aux propriétés des photocathodes et à celles des plaques à électrons.

a) Photocathodes.

Le rendement quantique des couches actuellement utilisées est de l'ordre de 10 % au moins : un photon sur 10 environ libère un électron (ceci est à peu près 100 fois meilleur que pour les émulsions photographiques les plus sensibles). Le grain des couches est très fin, donc la résolution est bonne. Et, de plus, le courant émis par la couche photoélectrique varie linéairement avec l'intensité de la lumière incidente.

b) Plaques à électrons.

Les plaques que nous utilisons sont des plaques "Ilford Nuclear Research Plates, G 5". Cette émulsion est particulièrement sensible aux électrons d'environ 25-30 kV et peu sensible à la lumière ; elle présente un excellent facteur de contraste. Un grand intérêt des plaques à électrons de ce type est la linéarité de leur réponse pour des électrons de 25 kV, comme l'a montré P. Vernier [2]. Nous avons utilisé cette propriété pour des mesures photométriques (voir chapitre IV). Un autre sérieux avantage est que ces plaques n'ont pas de seuil de sensibilité ; on a montré qu'elles étaient capables d'enregistrer une simple trace d'électron. Ceci est nettement mis en évidence par le fait suivant : au voisinage de H_α, les plaques 103 aF sont parfois plus sensibles que certaines cellules (raies d'étalonnage plus noires), et pourtant sur les clichés pris avec la caméra électronique avec ces photocathodes, dès raies apparaissent comme une trace, alors qu'elles sont invisibles sur des clichés ordinaires.

Ces propriétés des photocathodes et des plaques procurent un gain appréciable sur les temps de poses astronomiques. Celui-ci est de l'ordre de 30 pour les poses qu'a nécessitées ce travail.

6. Observations des nébuleuses planétaires.

Le tableau ci-dessous donne les renseignements concernant les nébuleuses étudiées.

La 1ère colonne indique le numéro de la nébuleuse, donné par le "New General Calatogue"ou l'"Index Catalogue" de Dreyer [3] ;

dans les 2ème et 3ème colonnes se trouvent l'ascension droite et la déclinaison rapportées à l'équinoxe 1950,0 ;

dans les 4ème et 5ème colonnes sont indiquées les coordonnées galactiques rapportées au même équinoxe, calculées d'après les données relatives au pôle galactique :

$$\alpha_{50} = 12^h49^m \qquad \delta_{50} = +27°,4 \ ;$$

dans les deux colonnes suivantes, nous avons reproduit les magnitudes apparentes de la nébuleuse et de l'étoile centrale données par le catalogue de Becvar [4],

et dans la dernière colonne les dimensions apparentes en secondes d'arc, tirées du même catalogue.

Nébuleuse	α_{50}	δ_{50}	l_{50}	b_{50}	$m_{néb}$	$m_{\star}$	Dimensions
NGC 650-1	$1^h 39^m,1$	+51° 19'	131°	-11°	12,2	16,6	157" × 87"
IC II 1747	1 53,8	+63 04	130	+ 1	13,6	15,0	13
NGC 1501	4 02,6	+60 47	145	+ 6	13,3	13,4	56 × 48
NGC 1514	4 06,1	+30 38	166	-15	10,8	9,7	120 × 90
IC II 2149	5 52,6	+46 07	166	+10	9,9	14	15 × 10
NGC 2371-2	7 22,4	+29 35	189	+20	13,0	13,3	54 × 35
NGC 2392	7 26,2	+21 01	198	+17	8,3	10,5	47 × 43
NGC 3242	10 22,4	-18 23	260	+32	9,0	11,4	40 × 35
NGC 3587	11 12,0	+55 18	149	+57	12,0	14,3	203 × 199
IC II 3568	12 32,4	+82 51	124	+34	11,6	12,0	18
NGC 6058	16 02,8	+40 49	65	+48	12,3	13,4	25 × 20
IC II 4593	16 09,5	+12 12	25	+41	10,2	10,2	15 × 11
NGC 6210	16 42,5	+23 53	43	+37	9,7	12,5	20 × 13
NGC 6572	18 09,7	+ 6 50	35	+12	9,6	12	16 × 13
NGC 6720	18 51,7	+32 58	63	+14	9,3	14,7	83 × 59
NGC 6803	19 28,9	+ 9 58	46	- 4	11,4	14,1	5
NGC 6804	19 29,2	+ 9 07	46	- 5	13,3	13,3	63 × 50
NGC 6853	19 57,4	+22 35	60	- 4	7,6	13,4	480 × 240
NGC 6879	20 08,1	+16 46	57	- 9	12,1	15,2	5
NGC 6881	20 09,0	+37 16	74	+ 2	14,3	15,1	5
NGC 6891	20 12,8	+12 35	54	-12	11,4	11,6	15 × 7
NGC 7008	20 59,1	+54 21	93	+ 6	13,3	12,9	86 × 69
NGC 7027	21 05,1	+42 02	85	- 3	10,4	17,1	18 × 11
IC 1470	23 03,2	+59 59	110	0	8,1	11,9	70 × 45
NGC 7662	23 23,5	+42 14	107	-18	8,9	12,5	32 × 28

CHAPITRE II

SPECTRES DES NÉBULEUSES ET DE LEURS NOYAUX

A la suite de Wright [5], plusieurs auteurs ont compris l'importance capitale de la connaissance des noyaux de nébuleuses planétaires et apporté une contribution plus ou moins importante à l'avancement de ce problème (voir à ce sujet la bibliographie donnée par Wurm [6]). Depuis cette époque, le travail de P. Swing [7] est certainement le plus important qui ait été réalisé sur ce sujet. Mais l'étude des étoiles centrales de ces nébuleuses est rendue très difficile par leur faible magnitude apparente. Il était tout indiqué d'essayer, avec la caméra électronique, d'augmenter nos connaissances sur ce sujet.

A. DESCRIPTION DES SPECTRES -

Examinons les spectres obtenus, tant du point de vue du noyau que de celui des émissions nébulaires de son enveloppe, car peu d'objets ont été observés en dehors de la région bleue des plaques photographiques.

1. NGC 650-1.

Cette nébuleuse de grandes dimensions apparentes semble avoir été peu observée. Outre les cinq premières raies de la série de Balmer de l'hydrogène, celles de [O III], [O II], [Ne III] signalées par Minkowski [8], apparaissent très nettement celles de l'helium neutre He I 5876, 4921, 4471 et celles de l'helium ionisé He II 5411, 4686, 4541. D'autres raies interdites sont également visibles ; ce sont : [O I] 6364, 6300 ; [N II] 6584, 6548, 5755 ; [N I] 5200 ; [S II] 6731, 6717, 4069 ; [A IV] 4740, 4711 ; [Cl III] 5538, 5517 très faibles.

Aucun spectrogramme du noyau n'a pu être obtenu.

2. IC II 1747.

Cette nébuleuse d'aspect quasi-stellaire a été observée par Swings [7] à l'Observatoire Mac Donald ; malheureusement, son spectre a été perturbé par la présence de la Lune lors de la prise des clichés. En plus des raies signalées par Wright [5] d'une part et Swings d'autre part, nous trouvons les raies suivantes : H_α ; He I 6678, 5876, 4921 ; [O I] 6300 ; [N II] 6584, 6548 ; [S II] 6731, 6717, 4069 (faible) et le doublet de [Cl III] 5538, 5517.

L'étude du spectre du noyau a déjà été publiée [9]. Rappelons qu'il présente de larges bandes d'émission superposées au continuum : l'une d'entre elles peut être attribuée à une superposition de raies de C III 4647, 4650, et C IV 4659, tandis que la présence de N III y semble douteuse. He II 4686 appartient à la fois au noyau (bande large) et à la nébuleuse (raie haute et relativement fine). Une autre bande d'émission très intense s'étend de 5778 à 5836 ; elle doit être attribuée à C IV 5812, 5802 et peut-être à C III 5828. On trouve également d'autres raies larges : He II 5411, 4541 ; C II 4267 ; C III 5696 (très faible), 5277 ; C IV 4786 et O V 5592 et 5470. Avec une certaine sécurité, ce noyau peut être classé parmi les étoiles WC ; mais l'intensité de la raie 5696 est si faible que les valeurs des rapports 5696/5812 et 5696/5592 considérés par Beals [10] comme critères de classification, ne permettent pas de lui attribuer même la 1ère sous-classe WC 6.

3. NGC 1514.

La magnitude de cette nébuleuse très étendue est faible ; et par contre, son noyau est un des plus brillants de tous les noyaux de nébuleuses planétaires. Pour la région bleue, la présence des raies nébulaires classiques [O III] 5007, 4959, 4363 et celles de la série de Balmer a été signalée par Minkowski [8]. Nous pouvons y ajouter, outre H_ω les raies He II 4686 et [A IV] 4740, 4711 faibles, qui s'étendent sur une large partie centrale de la nébuleuse.

Quant au noyau, il est d'une classe spectrale tout-à-fait inhabituelle pour les objets de ce genre. Mis Payne [11] le range dans les étoiles O 8 tandis que Mac Laughlin [12] le classe B 9. Sur un seul spectre un peu surexposé de l'étoile centrale, seules les raies de la série de Balmer apparaissent en absorption ; ceci nous conduit à le classer parmi les étoiles A 0, type spectral exceptionnellement froid -s'il est exact- pour un noyau de nébuleuse planétaire.

4. IC II 2149.

Après Wright et Aller, Swings a observé cette nébuleuse. Nous ne reviendrons pas sur leurs travaux, si ce n'est pour ajouter quelques raies situées principalement dans la région visible du spectre. Ce sont : He I 6678, 4921, 4713 ; [O I] 6364, 6300 très faibles ; [N II] 6584, 6548, 5755 ; [Cl III] 5538 probable ; et le doublet de [S II] 6731, 6717 qui est passé inaperçu pour Y. et H. Andrillat [13] peut-être à cause de la sensibilité, assez faible dans cette région, des plaques 1 N qu'ils utilisent.

Le spectre du noyau semble continu, sans raies d'absorption ; mais il n'est pas impossible qu'il existe vers 5812 A une émission discrète. Aller et Wilson [14] qui en ont obtenu des spectres beaucoup plus dispersés que les nôtres, ont observé de nombreuses raies d'absorption, ce qui les a conduits à classer cette étoile O 7, 5.

5. NGC 2371-2.

Nébuleuse d'assez grandes dimensions apparentes, mais de faible brillance superficielle, NGC 2371-2 ressemble par son aspect extérieur à NGC 650-1. Selon Minkowski [8], son spectre montre, en émission, les raies de la série de Balmer, He II 4686 très intense, [O III] 5007, 4959, 4363, [Ne III] 3967, 3869. L'utilisation de la caméra électronique a permis de mettre en évidence de nombreuses autres raies nébulaires : He II 5411 et 4541 ; [A IV] 4740 et 4711 ; et dans les régions les plus brillantes de la nébuleuse : [N II] 6584, 6548 ; [S II] 6731, 6717, 4069 ; peut-être y trouve-t-on aussi He I 5876 et [O I] 6300.

Le noyau de cette nébuleuse, très faible, apparaît seulement comme un léger spectre continu dans la région bleue, et on ne peut en tirer aucun indice quant à sa classe spectrale.

6. NGC 2392.

Nébuleuse brillante, elle a été très souvent observée, aussi n'insisterons nous pas. Toutefois, un cliché pris avec la chambre I du grand spectrographe montre quelques raies non signalées : outre les raies de la série de Balmer jusqu'à H_{21} 3679, on trouve He I 5016 et 3819, N II 3838, O III 3444 et dans la couche qui enveloppe immédiatement l'étoile centrale He I 4713.

Son noyau (surexposé sur notre cliché) a été classé O f par plusieurs auteurs.

7. NGC 3242.

Cette nébuleuse a été observée avec le grand spectrographe du télescope de 193 cm. Son spectre n'a pu être repris avec la caméra électronique à cause de sa position (δ = - 18°). Aussi, mis à part les raies intenses de H_α, He I 5876 et He II 5411, la région bleue est-elle la seule véritablement étudiée. La série de Balmer est visible jusqu'à la raie H_{22} 3676 ; les raies de l'helium sont également nombreuses : He I 5016, 4471, 4026, 3926, 3889, 3820, 3785, 3447 ; He II 4686, 4542, 4200, 3923. On observe également des raies de N, C, O à différents degrés d'ionisation : O III 3791, 3760, 3757, 3754, 3715, 3707, 3444, 3429, 3341, 3312 ; C II 4267 ; N III 4640, 4634, 4200, 4097, puis les raies interdites fréquemment rencontrées dans les nébuleuses : [O III] 5007, 4959, 4363 ; [O II] 3729, 3727 ; [A IV] 4740, 4711 ; [Ne III] 3967, 3869.

On ne peut malheureusement rien dire de l'étoile centrale, le spectre de la Lune se superposant à celui du noyau.

8. NGC 6058.

C'est une nébuleuse planétaire très faible dans laquelle nous n'avons pu observer que les raies classiques de H, [O III], He I 5876, 4921, 4471, 4026, et He II 4686.

Le spectre du noyau est intense ; il offre l'aspect d'un spectre continu : c'est ainsi que l'a vu Wright [5].

9. IC II 4593.

C'est un objet petit à noyau très brillant ; l'observation des raies nébulaires est, de ce fait, rendue difficile. Toutefois, son spectre montre nettement, outre les raies de la série de Balmer, les deux principales raies de [O III], le doublet de [O II] observés par Wright [5], plusieurs raies de l'helium : He I 6678, 5876, 4921, 4471 et le doublet de [N II] 6584, 6548 contrairement aux observations de White [15]. On y trouve aussi très probablement le doublet de [S II] 6731, 6717.

Le spectre du noyau a un continuum très intense sur lequel apparait une bande assez large aux environs de 4640-4650 dûe vraisemblablement à N III et C III. Aller et Wilson [14] classent cette étoile O 7 par son spectre d'absorption. Il semble qu'à cause de cette bande d'émission, il serait plus correct de lui attribuer le type O f.

10. NGC 6210.

La nébuleuse NGC 6210 est petite et brillante ; c'est un des premiers objets pour l'étude duquel la caméra électronique ait été employée. Les données obtenues ont été complétées dans la région bleue par un cliché pris avec la chambre I du grand spectrographe. Ce spectre a déjà été décrit par Wright [5] qui, dans cette même région, observe de nombreuses raies : celles de H depuis H_β jusqu'à H_ε, celles de [O III], celles de He I 4471, 4026, celles de [Ne III] et le doublet de [O II] 3729, 3727. A ces observations, nous pouvons ajouter plusieurs raies apparaissant dans l'enveloppe gazeuse ; tout d'abord, la série de Balmer est très intense et visible depuis H_α

jusqu'à H_{24}. He I a un spectre très riche en raies d'émission : 6678, 5876, 5048, 4921, 4713, 4471, 4388, 4144, 4121, 4026, 4009, 3965, 3889, 3820, 3704, 3634. He II 4686 n'apparait que dans la partie la plus centrale de la nébuleuse comme [A IV] 4740, 4711. Les deux raies de [O I] 6364 et 6300 sont fortes, cette dernière étant élargie très probablement par [S III] 6310. [N II] montre les raies 6584, 6548, 5755 ; [S II] celles de 6731, 6717, 4076 et 4069, et [Cl III] 5538, 5517. Toujours pour les raies interdites, on observe très probablement [Fe VII] 4894 et [Ne V] 3426 et 3345, ces émissions correspondant à un potentiel d'ionisation très élevé.

L'étoile centrale possède des raies de He I en émission ; les plus fortes sont 4144, 4121. Les raies 4641, 4634 de N III semblent appartenir aussi au noyau, mais 4103, 4097 ont des hauteurs plus grandes que le spectre continu de l'étoile centrale. De même, pour O III où les raies 3760, 3757, 3755 sont courtes et larges, tandis que 3444 est plus haute et plus fine. C IV 4659 , C III 4650 et 4069, C II 4267 apparaissent dans le noyau, cette dernière raie plus large étant superposée à la raie nébulaire plus haute de [S II]. Suivant les auteurs, l'étoile centrale a été classée O f [16] ou WR [17]. Il semble qu'elle fasse partie de ces noyaux de nébuleuses planétaires qui sont des objets intermédiaires entre les étoiles O f et WR.

11. NGC 6720.

Bien que cette nébuleuse ait attiré l'attention des observateurs depuis de très longues années, il semble, qu'à cause de sa faible luminosité, son spectre nébulaire ne soit guère connu autrement que par les observations de Wright [5]. En plus des raies qu'il a signalées, et grâce à la caméra électronique, nous avons pu en mettre en évidence plusieurs autres qui prennent naissance dans des régions différentes de l'enveloppe. H_α comme les autres raies de l'hydrogène s'étend depuis le centre jusqu'au bord extérieur de la nébuleuse, avec toutefois une intensité variable selon la distance au centre du point considéré (cet aspect des raies sera précisé dans la suite de ce travail). He I mis en évidence par les raies 5876, 4921, 4471 est très faible dans la partie centrale et renforcé dans l'anneau, tandis que He II qui exige un potentiel d'ionisation plus élevé se manifeste dans une région plus centrale par les raies 5411, 4686 et 4541. [O III] s'étend dans toute la nébuleuse alors que [O II] a une structure nettement annulaire comme [O I] 6364, 6300, [S II] 6731, 6717, [N II] 6584, 6548, 5755 (toutes trois très intenses comme [O II]), [N I] 5200, [Cl III] 5538, 5517 et [Ne III]. [A IV] 4740,4711 se situe dans la même région que He II. Une raie large formée probablement par N III 4640-4634 a approximativement le même diamètre extérieur que He II, mais elle est beaucoup plus faible dans la région qui entoure l'étoile centrale. Vers 4575 A, se trouve une raie faible dont la structure se rapproche de celles de He I ; on peut l'attribuer à 4571 MgI.

Quant à l'étoile centrale, le spectre très faible ne fait apparaître que son continuum qui se prolonge très loin dans le visible. Il est impossible d'y distinguer des raies d'émission ou d'absorption, quoiqu'il ne paraisse pas absolument uniforme dans son intensité.

12. NGC 6803.

C'est un objet très petit, d'aspect stellaire dont Wright [5] a étudié le spectre dans la région photographique bleue. A ces observations reprises par Aller [18], le seul cliché obtenu avec la caméra électronique permet d'ajouter quelques raies dans la région visible. Ce sont : H_α, He I 5876, [N II] 6584, 6548, et 5755, et peut-être aussi [Cl III] 5538. Comme le signale Aller, le spectre continu du noyau montre une bande large qui s'étend à partir de 4630 sur plus de 100 A. La qualité de notre cliché n'en permet pas la résolution.

13. NGC 6804.

Cette nébulosité de faible brillance a été étudiée par Minkowski [8]. Les seules observations à ajouter aux siennes sont : l'absence de [N II] autour de H_α, la présence probable de [A V] 6435 et la présence certaine de [O III] 4363.

Le spectre du noyau ne fait apparaître qu'un continuum.

14. NGC 6853.

La nébuleuse Dumbbell est une nébuleuse planétaire à très grand diamètre apparent. Minkowski [8] l'a étudiée parmi un groupe de nébuleuses de faible brillance superficielle. Nos clichés montrent de nombreuses raies nébulaires ; celles de la série de Balmer tout d'abord, puis celles de l'helium : He I 6678, 5876, 5016, 4921, 4471 ; He II 5411, 4686 très intense, 4541. On trouve aussi dans son spectre de nombreuses raies interdites : pour [O III] 5007, 4959, 4363 ; pour [S II] 6731, 6717 et 4069 (probable), pour [N II] 6584, 6548 et 5755, pour [N I] 5200, pour [O II] le doublet 3729-3727, pour [Ne III] 3967, 3869 et enfin pour [A IV] 4740, 4711.

L'étoile centrale a un spectre continu auquel se superposent probablement des raies de l'helium en émission ; celle qui apparaît le plus nettement est He I 5876.

15. NGC 6879.

C'est une nébuleuse d'aspect stellaire ; elle n'a été étudiée que par Wright [5] qui signale les raies de la série de Balmer, celles de [O III] et [Ne III] 3869. Sur nos clichés, d'autres raies viennent s'ajouter à celles-ci. Ce sont d'abord H_α et toute une série de raies de He I : 6678, 5876, 4471 et probablement 4121, 4026. Puis viennent les transitions interdites que l'on rencontre fréquemment dans les enveloppes des nébuleuses : [O I] 6364, 6300 et 5577 qui s'ajoute à la raie verte du ciel nocturne, le doublet de [N II] 6584, 6548, celui de [S II] 6731, 6717. La raie en émission 6300 est large, ce qui laisse supposer que pourrait s'y ajouter 6310 de [S III].

Le spectre du noyau est un continuum auquel se superposent des raies d'émission qui ne le dépassent pas en hauteur et semblent, de ce fait, appartenir à l'étoile centrale, ou tout au moins à son enveloppe immédiate. Ce sont les raies : He II 4686 et [A IV] 4740, 4711. De plus, une large bande (environ 30 A), plus certainement d'origine nucléaire correspond aux émissions de N III 4640, 4634 et C III 4651, 4647. Elle pourrait également comprendre C IV 4659, mais les clichés ne montrent pas la bande 5812-5802 qui est généralement intense quand cet atome entre dans la composition du noyau. Avec la faible dispersion donnée par le système utilisé, aucune raie en absorption n'est visible. La classification spectrale de l'étoile centrale reste douteuse ; on peut supposer qu'elle aussi appartient à ce type intermédiaire entre les étoiles O f et les WR pures, type qui ne semble pas rare dans les noyaux de nébuleuses planétaires.

16. NGC 6881.

Voici encore une nébuleuse à faible brillance superficielle étudiée par Minkowski [8]. A part les deux raies nébulaires de [O III], il n'y a pas d'émission forte dans la région bleue, alors que H_α et [N II] 6584, 6548 sont toutes trois très intenses. Dans cette même région, apparaissent faiblement [S II] 6731, 6717, [O I] 6364, 6300, et He I 6678, 5876. Dans la région bleue, seules sont observables les raies de Balmer, He II 4686 très faible et [Ne III] 3869. Les intensités des raies de Balmer montrent que NGC 6881 est très fortement rougie par l'absorption interstellaire.

Aucune trace de noyau n'apparaît sur nos clichés.

17. NGC 6891.

Swings a étudié récemment [7] le spectre de cette nébuleuse et de son noyau. Nos clichés n'ajoutent que peu de choses au spectre nébulaire : He I 6678, 4921, [O I] 6364, 6300, 5577 et probablement [S II] 6731, 6717.

Aller a observé, dans le spectre du noyau, des raies d'absorption de H et He II qui n'apparaissent pas sur nos clichés. Par contre, ils montrent une large bande en émission débutant vers la longueur d'onde 4630 A et s'étendant nettement au-delà de 4686 A, avec un renforcement de l'intensité du côté violet. Elle est probablement dûe, d'une part au groupe C III - N III 4650 - 4634, d'autre part à He II 4686 signalée par Swings et peut-être aussi à [A IV] 4740, 4711 émis par

la partie la plus centrale de l'enveloppe. Une autre bande en émission, qui n'a pas été vue par Swings, doit être attribuée avec certitude à C IV 5812, 5802. Ces caractères indiquent une fois encore pour l'étoile centrale un type intermédiaire entre les étoiles WR et les étoiles O f.

18. NGC 7008.

Ici encore, nous avons affaire à une nébuleuse de grandes dimensions apparentes et de faible brillance. Minkowski [8] a mesuré les intensités des raies de la série de Balmer, celles de [O III] et de He II 4686. Les clichés obtenus avec la caméra électronique montrent quelques raies supplémentaires : H_α, puis He I 5876, 4471, He II 5411, 4541, [A IV] 4740,4711, N III 4640, 4634 et probablement [Cl III] 5538, 5517. Un caractère frappant de cette nébuleuse, surtout si l'on examine des clichés à faible durée de pose, c'est l'intensité de la raie He II 4686 par rapport à celle de H_β : elle lui est au moins égale.

Le spectre de l'étoile centrale apparaît comme continu.

19. IC 1470.

Il semble bien que, depuis Hubble en 1921, on se soit peu intéressé à cette nébuleuse qui n'est pourtant pas particulièrement faible. Le spectre de l'enveloppe montre les raies de la série de Balmer : H_α, H_β, H_γ, H_δ, H_ϵ, H_ζ ; les raies de He I : 6678, 5876, 4921, 4471, celles de [O III] : 5007, 4959, 4363, celles de [O II] 3729, 3727 et de [O I] 6364, 6300, 5577 ; et également les raies de [N II] 6584, 6548, celles de [S II] 6731, 6717. Il n'y a pas de trace de He II.

Le spectre de la brillante étoile centrale semble continu ; on y remarque seulement l'absorption interstellaire 6284, non identifiée.

20. Résumé des observations des raies nébulaires.

Dans les enveloppes gazeuses des nébuleuses planétaires, les processus d'excitation des raies spectrales en émission sont au nombre de trois :

1) Photoionisation et recombinaison : c'est le mécanisme qui est responsable de l'émission de la plus grande partie des raies spectrales permises ;

2) Excitation par chocs d'électrons : peu efficace pour produire les raies permises, ce mécanisme est valable pour expliquer l'excitation des raies interdites ;

3) Fluorescence : par une double coïncidence fortuite, Bowen explique ainsi la sélection dans l'excitation de certaines raies de O III et N III, pour des nébuleuses contenant une quantité suffisante de He II [19].

Nous allons donner dans le tableau 2 un résumé des observations des raies nébulaires en les classant selon le processus d'excitation qui les produit. Les atomes et les ions responsables seront rangés dans l'ordre des potentiels d'ionisation décroissants. Les raies produites par les 2ème et 3ème mécanismes seront évidemment affectées aux ions du degré inférieur ; par exemple, les raies de [O III] seront placées dans la colonne O II puisqu'elles prennent naissance dans la même enveloppe que les raies de recombinaison de O II. Chaque raie est représentée par un numéro qui correspond à une longueur d'onde indiquée dans le tableau 1.

TABLEAU 1

A V	1	6435											
A IV	1	4740	2	4711									
Cl III	1	5538	2	5517									
S III	1	6310											
S II	1	6731	2	6717	3	4076	4	4069					
Ne V	1	3426	2	3345									
Ne III	1	3967	2	3869									
O III	1	5007	2	4959	3	4363							
O II	1	3729	2	3727									
O I	1	6364	2	6300	3	5577							
O III Fl	1	3791	2	3760	3	3757	4	3755	5	3715	6	3707	7	3444
	8	3429	9	3341	10	3312								
NII	1	6584	2	6548	3	5755								
NI	1	5200												
N III Fl	1	4640	2	4634	3	4102	4	4097						
He II	1	5411	2	4686	3	4542	4	4200	5	4026	6	3924		
He I	1	6678	2	5876	3	5048	4	5016	5	4921	6	4713	7	4471
	8	4388	9	4144	10	4121	11	4026	12	4009	13	3926	14	3889
	15	3820	16	3785	17	3634	18	3448						
H	1	6563	2	4861	3	4340	4	4101	5	3970	6	3889	7	3835
	8	3798	9	3771	10	3750	11	3734	12	3722	13	3712	14	3704
	15	3697	16	3692	17	3687	18	3682	19	3679	20	3676	21	3674
	22	3671												

Dans le tableau 2 :

1) Les ions ont été rangés suivant les potentiels d'ionisation décroissants.

2) Les raies de [O I] et [N I] ont été classées dans les colonnes intitulées O et N.

3) R = Recombinaison 1er mécanisme

E = Excitation par chocs 2ème mécanisme

F = Fluorescence 3ème mécanisme.

TABLEAU 2

Nébuleuse		Ne IV	A IV	He II	Ne II	A III	O II	N II	He I	Cl II	S II	N I	O I	H	S I	N	O	
650-1	R			1 2 3					2 5 7					1 2 3 4 5				
	E				1 2	1 2	1 2 3			1 2		1 2 3	1 2		1 2 4	1	1 2	
II 1747	R			2					1 2 5 7					1 2 3 4 5 6				
	E				1 2	1 2	1 2 3			1 2		1 2	1 2		1 2 4			
1514	R			2										1 2 3				
	E					1 2	1 2 3											
II 2149	R								1 2 4 5 6 7					1 2 3 4 5 6 7 8 9				
	E				1 2		1 2 3			1		1 2 3	1 2		1 2		1 2	
2371-2	R			1 2 3					2					1 2 3 4 5				
	E				1 2	1 2	1 2 3					1 2			1 2 4		2	
3242	R			1 2 3 4 5 6					2 4 7 11 13 14 15 16 18					1 2 etc. 19 20				C II 4267
	E				1 2	1 2	1 2 3	1 2 3 4					1 2					
	F						1 2 etc. 9 10											
6058	R			2					1 5 7 11					1 2 3 4 5				
	E						1 2 3											
II 4593	R								1 2 5 7					1 2 3 4 5 6				
	E						1 2					1 2	1 2		1 2			

TABLEAU 2 (suite)

Nébuleuse		Ne IV	A IV	He II	Ne II	A III	O II	N II	He I	Cl II	S II	N I	O I	H	S I	N	O	
6210	R			2					1 2 etc. 16 17					1 2 etc. 21 22				
	E	1 2	1 2		1 2	1 2	1 2 3			1 2	1	1 2	1 2 3		1 2 3 4		1 2	Fe VII 4894
	F						7	3 4										
6720	R			1 2 3					2 4 7					1 2 3 4 5 6				Mg I 4571
	E				1 2	1 2	1 2 3			1 2		1 2 3	1 2		1 2	1	1 2	
	F							1 2										
6803	R								2 5 7					1 2 3 4 5 6				
	E				1 2		1 2 3			1		1 2 3	1 2					
6804	R			2										1 2 3 4				
	E		1				1 2 3											
6853	R			1 2 3					1 2 4 5 7					1 2 3 4 5 6				
	E				1 2	1 2	1 2 3					1 2 3	1 2		1 2 4	1		
6879	R								1 2 7 10 11					1 2 3 4 5 6				
	E				1 2	1 2	1 2 3				1				1 2	1 2	1 2 3	
6881	R			2					1 2					1 2 3 4 5				
	E				2		1 2					1 2			1 2		1 2	
6891	R			2					1 2 5 7 11					1 2 3 4 5 6				
	E				1 2	1 2	1 2 3					1			1 2		1 2 3	
7008	R			1 2 3					2 7					1 2 3 4 5 6				
	E					1 2	1 2 3			1 2								
	F							1 2										
I 1470	R								1 2 5 7					1 2 3 4 5 6				
	E						1 2 3					1 2	1 2		1 2		1 2 3	

B. DISCUSSION DES OBSERVATIONS

1. Stratification et expansion des nébuleuses planétaires.

a) Hauteur des raies spectrales.

Les hauteurs souvent très différentes des raies émises dans les enveloppes des nébuleuses planétaires mettent bien en évidence la stratification des états d'ionisation à l'intérieur de celles-ci. Au centre se trouvent les couches correspondant à un potentiel d'ionisation élevé ; en allant vers l'extérieur, on trouve celles à potentiel d'ionisation plus faible. Cet effet de stratification apparaît nettement sur les spectres nébulaires des objets dont le diamètre apparent est suffisamment petit pour se projeter complétement sur la hauteur de la fente du spectrographe. Nous en avons plusieurs exemples dans les reproductions ci-jointes. La plus grande hauteur utilisable de la fente du spectrographe E est de 4 mm, ce qui donne environ 1,5 mm sur la photocathode et 1 mm sur la plaque nucléaire. Ceci correspond à un diamètre angulaire d'environ 2'. Les nébuleuses dont les dimensions angulaires sont supérieures à 100'' ne doivent pas être considérées ici. Il faudra donc éliminer : NGC 650-1, NGC 1514 et NGC 6853. Sur celles qui restent, on constate que les raies les plus hautes sont celles de [O III], puis celles de H et que cette hauteur correspond pratiquement au diamètre extérieur de la nébuleuse.

Pour toutes les nébuleuses dans le spectre desquelles He II apparaît, sauf pour NGC 2371-2 et NGC 7008 où il est particulièrement intense, les raies émises par cet ion sont nettement plus courtes que celles émises par H (voir par exemple IC II 1747, NGC 6210). Courtes aussi sont les raies de [A IV], C III, N III, O III, dont les potentiels d'ionisation sont de l'ordre de 40-50 eV, alors que celles de He I sont généralement plus longues (P.I = 25 eV). Ceci n'est évidemment valable que d'une manière générale et d'autant plus que les nébuleuses sont petites. Car, dès que les dimensions apparentes s'accroissent de façon appréciable, on trouve dans l'enveloppe des zones de brillance non uniforme, et, selon les régions, la raie considérée apparaît ou non. Dans le cas des nébuleuses à très grand diamètre, on obtient des spectres un peu différents suivant la région observée. Signalons, en passant, que ceci suffit à expliquer les désaccords entre les mesures d'intensité faites par différents auteurs.

Cet effet s'explique aisément : la température du noyau étant très élevée, les régions de la nébuleuse qui sont proches de l'étoile centrale peuvent contenir des atomes plusieurs fois ou simplement ionisés. Par exemple, pour une nébuleuse à helium, le rayonnement se fera dans les raies de He II ; cette région s'arrête là où l'épaisseur optique au delà de la limite de la série principale de He II devient égale à l'unité. Au delà de cette région, le rayonnement de l'étoile capable de ioniser doublement He ne pénétre pas ; on aura donc seulement les raies de He I, etc..

L'aspect des raies permet aussi de distinguer les raies émises selon le mécanisme de fluorescense de celles émises par recombinaison. Nous en avons trouvé plusieurs exemples. Le critère s'explique par le mécanisme lui-même. Dans les nébuleuses dont le spectre montre les raies de He II, certaines raies de O III peuvent être excitées par la raie 303,780 A de He II qui coïncide presque avec la raie de résonnance de O III : 303,799 A. Cet ion se trouve ainsi porté à un certain niveau dont il redescendra soit directement, soit par sauts successifs en émettant un certain nombre de raies permises de O III. L'une de ces raies, celle qui le ramène finalement au niveau normal, peut par le même procédé exciter l'ion N III qui en redescendant en cascade jusqu'à l'état normal, émettra à son tour certaines raies permises de cet ion. Un tableau de ces raies a été donné par Bowen [19]. Il est bien évident qu'alors ces raies prendront naissance dans toute la région de la nébuleuse contenant He II avec une forte intensité. C'est donc la hauteur comparée des raies de He II à celle des raies de O III et N III qui permettra d'attribuer l'émission des raies considérées à l'un ou l'autre des mécanismes. Pour NGC 3242 et NGC 6720, on peut avoir une quasi-certitude que l'on est en présence d'un effet de fluorescence ; pour NGC 6210, cet effet est moins sûr, mais assez probable tout de même et nous l'avons considéré comme tel.

b) Forme des raies spectrales.

L'aspect des raies nébulaires diffère sensiblement suivant que l'on considère un objet de petite ou de grande dimension apparente. Pour ces derniers, les raies représentent l'image de la fente ;

mais pour les nébuleuses d'aspect stellaire, les raies spectrales sont généralement élargies dans la partie centrale. On peut attribuer cet effet à l'expansion de la nébuleuse. Le côté violet de la raie est l'image de la région antérieure de l'enveloppe ; elle se rapproche de l'observateur. Le côté rouge, au contraire, est dû à la partie qui se trouve la plus éloignée de l'observateur ; elle s'éloigne de lui.

Sur deux objets : IC II 1747 et NGC 6210, cet effet est particulièrement important. Ces nébuleuses doivent être assez denses et la lumière de la partie de la nébuleuse la plus éloignée nous parvient plus difficilement que celle de la région antérieure. Les raies ont de ce fait une allure dissymétrique (plus convexe vers le violet que vers le rouge) qui rend les mesures de position délicates. On ne peut attribuer cette forme des raies à une aberration de l'optique, car elle ne se produit systématiquement que pour certaines nébuleuses, spécialement celles qui viennent d'être signalées. Une plus grande dispersion avec une durée d'exposition équivalente mettrait en évidence cette expansion d'une manière plus caractéristique. Ajoutons que cet élargissement des raies est, bien entendu, d'autant plus net que la raie est plus haute et plus intense, c'est-à-dire qu'il est surtout visible sur les raies de l'hydrogène et de [O III].

2. Essai de classification des nébuleuses d'après l'aspect de leurs spectres.

L'étude qualitative des spectres de nébuleuses planétaires permet de classer très grossièrement ces objets suivant leur degré d'excitation croissant. Avec Wurm, nous utiliserons les critères suivants, mettant :

- dans un 1er groupe les nébuleuses pour lesquelles [O III] 5007/Hβ est inférieur à 1, He II étant absent ;

- dans un 2ème groupe, celles pour lesquelles [O III] 5007/Hβ est supérieur à 1, He II 4686 étant présent, mais faible ;

- dans un 3ème groupe, celles pour lesquelles le rapport [O III] 5007/Hβ est grand de même que celui de He II 4686/Hβ.

Le 1er groupe ne contiendra aucune de nos nébuleuses planétaires si l'on considère la valeur du rapport [O III] 5007/Hβ (cette valeur est très souvent plus petite que 1 dans les nébuleuses diffuses et beaucoup plus rarement dans les planétaires) ; nous rangerons tout de même dans ce groupe celles pour lesquelles He II 4686 n'apparaît pas. Ce sont :

IC II 2149, IC II 4593, IC 1470.

Elle correspondent à un faible potentiel d'excitation, inférieur à 50 eV puisque les raies de He II n'y sont pas visibles.

Le 2ème groupe comprendra 7 nébuleuses :

IC II 1747, NGC 1514, NGC 6210, NGC 6803, NGC 6879, NGC 6881, NGC 6891.

Le 3ème groupe comprendra les 9 nébuleuses qui restent, auxquelles nous pouvons en ajouter deux bien connues dont les spectres nous ont servi de comparaison pour les mesures spectrophotométriques dont il sera question ultérieurement. On inclura donc parmi les nébuleuses à forte excitation :

NGC 650-1, NGC 2371-2, NGC 2392, NGC 3242, NGC 6058, NGC 6720, NGC 6804, NGC 6853, NGC 7008, NGC 7027, NGC 7662.

Cette classification n'est que grossière ; en effet, il apparaît nettement qu'une classification à une dimension n'est pas acceptable, étant donné la diversité des nébuleuses planétaires. Nous n'insisterons pas davantage.

3. Types spectraux des noyaux.

Dans tout ce travail, nous avons choisi d'étudier des nébuleuses planétaires dont les noyaux étaient mal ou pas connus. Si pour certaines nébuleuses, il n'a pas été possible d'apporter de données sur le spectre nucléaire, nous avons tout de même précisé les types spectraux de quelques noyaux. Un fait important est à noter : plus les moyens techniques d'observation se perfectionnent, moins les spectres des noyaux apparaissent comme continus. Ce qui était passé inaperçu, bien souvent, à cause de la faible dispersion des spectres ou à cause de l'impossibilité de recueillir assez de lumière sur la plaque photographique, apparaît petit à petit. Aussi la réalité de nombreux spectres continus pour les étoiles centrales des nébuleuses planétaires semble-t-elle disparaître devant les possibilités croissantes d'observation.

Sur les 19 noyaux considérés, Wright n'avait signalé des raies que pour 3 d'entre eux. Ici, deux n'ont pû être observés, certainement à cause de leur magnitude trop faible : selon Wright, environ 16 pour NGC 650-1, tandis que le noyau de NGC 6881 n'a pas encore été vu. Six présentent un aspect absolument continu ; à ce continuum vient se superposer, pour deux autres, de très probables raies d'émission. Si nous éliminons le spectre de NGC 3242 perturbé par la Lune, il en reste huit qui offrent des types variés : un est du type O pur, un du type A 0 et enfin cinq montrent à la fois des raies d'absorption (selon Aller) et des raies d'émission (selon nos observations). Ces derniers, les plus nombreux, ont encore des aspects variés.

Nous pouvons résumer comme suit les observations nucléaires :

Nébuleuse	Spectre du noyau
NGC 650-1	invisible
IC II 1747	WC
NGC 1514	A 0
IC II 2149	O 7, 5 (Aller)
NGC 2371-2	continu
NGC 2392	O f
NGC 3242	----
NGC 6058	continu
IC II 4593	O 7 f
NGC 6210	O f - WR
NGC 6720	continu
NGC 6803	continu + bande vers 4340
NGC 6804	continu
NGC 6853	continu + He 5876 (?)
NGC 6879	O f - WR
NGC 6881	invisible
NGC 6891	O f - WR
NGC 7008	continu
IC 1470	continu

De nombreux observateurs se sont posés la question de savoir s'il existe une relation entre la composition du noyau d'une nébuleuse planétaire et celle de son enveloppe. Mais il semble bien qu'une grande variété soit possible dans cette catégorie d'objets. On trouve des noyaux dont les spectres diffèrent du tout au tout dans des nébuleuses dont les excitations sont du même ordre, et réciproquement des noyaux semblables ne sont pas entourés d'enveloppes identiques.

Il faudra encore obtenir de nombreuses observations de ces objets, avec des moyens puissants, avant de pouvoir en tirer une conclusion satisfaisante, dans un sens ou dans l'autre.

CHAPITRE III

VITESSES RADIALES

A. DETERMINATION DES VITESSES RADIALES A L'AIDE DE LA CAMERA ELECTRONIQUE -

1. Spectre de comparaison.

La mesure des vitesses radiales des nébuleuses sur les clichés de la caméra électronique s'effectue différentiellement, par rapport à des raies d'étalonnage, comme sur les clichés obtenus par les procédés photographiques ordinaires. Ici, les raies servant de repères sont celles du palladium et du néon. Les raies du néon utilisables pour ce travail ont des longueurs d'onde bien déterminées [20]. Celles du palladium ont été sélectionnées, d'une part sur un spectre plus dispersé que ceux obtenus avec la caméra électronique de façon à éliminer les raies qui sont "blend", d'autre part expérimentalement : 9 ont été retenues comme valables pour ce travail dans l'intervalle 3890-5400 A.

L'ensemble des longueurs d'onde de ces raies est donné dans le tableau ci-dessous :

N°	Id	λ	N°	Id	λ
1	Pd	3894,20	10	Ne	5852,49
2	Pd	3958,60	11	Ne	5944,83
3	Pd	4212,95	12	Ne	6074,34
4	Pd	4473,59	13	Ne	6143,06
5	Pd	4817,51	14	Ne	6334,43
6	Pd	4875,43	15	Ne	6402,25
7	Pd	5163,83	16	Ne	6506,53
8	Pd	5295,61	17	Ne	6678,28
9	Pd	5395,26	18	Ne	6929,47

2. Distorsion.

Toutefois, le calcul des vitesses radiales se complique du fait que l'optique électronique introduit de la distorsion. Cette aberration est assez importante pour que l'on soit obligé d'en tenir compte. Elle produit une variation de la dispersion linéaire donnée par le système optique du spectrographe ; voyons comment elle intervient.

Soit C le centre optique du plan objet (plan de la photocathode) et C' le centre optique du plan image (plan de la plaque nucléaire). Le point C' peut-être matérialisé par le centre de la tache ionique, si elle existe : ceci se produit accidentellement quand le vide réalisé dans le tube n'est pas suffisamment poussé (fuite ou dégazage de certaines pièces).

La reproduction avec distorsion fait correspondre à un point-objet B de coordonnées x, y ou ρ, φ un point-image B' de coordonnées x', y' ou ρ', φ', l'axe des x étant dans le sens de la dispersion.

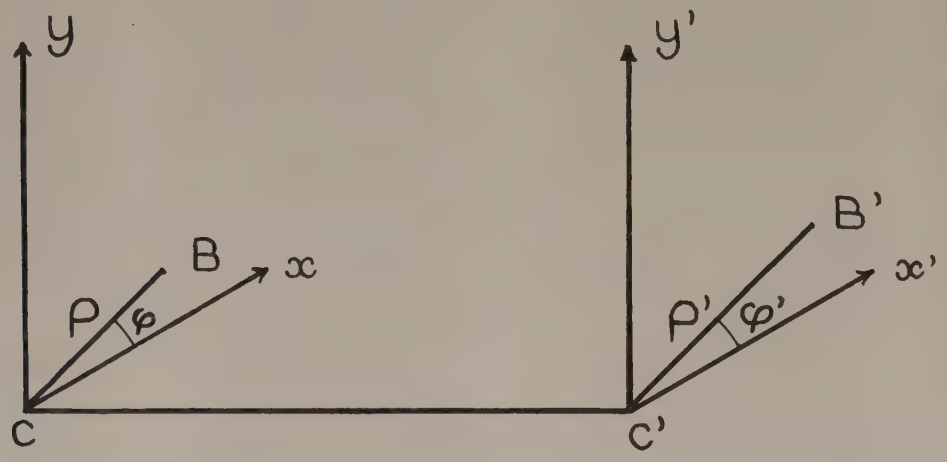


Figure 4 -

Mais la distorsion conserve les angles, donc :

$$\varphi' = \varphi$$

et l'on a :

$$\rho' = a\rho + b\rho^3$$

a, grandissement central,

b, coefficient de distorsion (b > 0 distorsion en coussinet, b < 0 distorsion en barillet).

La dispersion, qui est linéaire dans le plan objet, ne l'est plus dans le plan image.

a) Spectre passant par le centre optique C'.

Déterminons le grandissement moyen G_o dans la partie utilisable du spectre. Pour chaque raie, on aura :

$$x'_{mes} = ax + bx^3$$
$$x'_c = G_o\, x$$

d'où :

$$x'_{mes} = \frac{a}{G_o} x'_c + \frac{b}{G_o^3} x'^3_c = (1 + A)x'_c + Bx'^3_c$$

si l'on pose :

$$A = \frac{a}{G_o} - 1 \qquad \text{et} \qquad B = \frac{b}{G_o^3}.$$

La courbe de correction de la formule de dispersion aura pour équation :

$$\Delta x' = (1 + A)\, x'_c + B\, x'^3_c - x'_c = A\, x'_c + B\, x'^3_c$$
$$= B\, x' (x'^2 - x'^2_o)$$

$\Delta x'$ est nul pour :

$$x' = 0 \qquad \text{et} \qquad x' = x'_o = \pm \sqrt{\frac{-A}{B}}.$$

Sa dérivée :

$$(\Delta x')' = A + 3\, B\, x'^2$$

sera nulle pour :

$$x'_{\substack{\text{Max} \\ \text{min}}} = \pm \sqrt{-\frac{A}{3B}} = x'_o \frac{\sqrt{3}}{3}$$

On a alors :

$$\Delta x'_{\substack{\text{Max} \\ \text{min}}} = A\, x'_o \frac{\sqrt{3}}{3} + B\, x'^3_o \frac{\sqrt{3}}{9} = -2\, B\, x'^3_{\substack{\text{Max} \\ \text{min}}}.$$

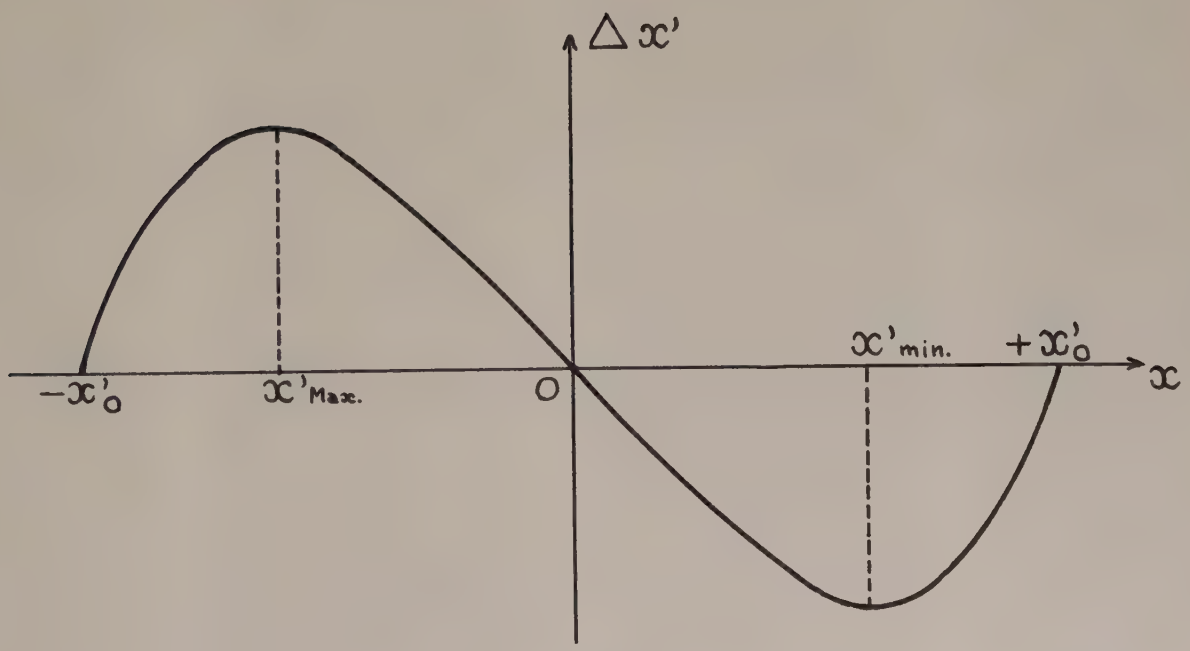


Figure 5 -

b) Spectre ne passant pas par le centre optique C'.

On choisit encore G_o ; pour chaque raie, on a :

$$x'_c = G_o x$$
$$x''_{mes} = a x + b \rho^2 x$$

ou encore, h étant la distance à l'axe des x du point où l'on fait la mesure :

$$x''_{mes} = \frac{a}{G_o} x'_c + \frac{b}{G_o} x'_c \left[\frac{x'_c}{G_o^2} + \frac{h^2}{G_o^2} \right]$$
$$= (1 + A) x'_c + B x'^3_c + Bh^2 x'_c$$

car $x'' \# x'$.

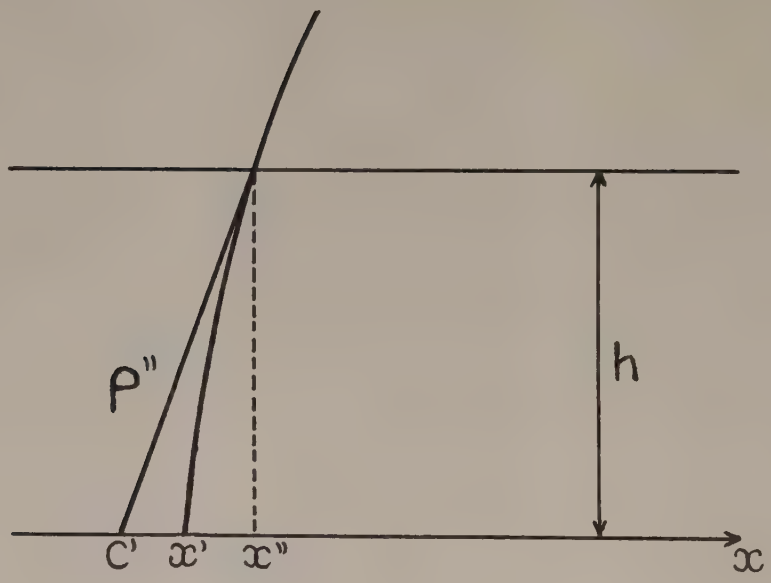


Figure 6 -

L'équation de la courbe de correction sera :

$$\Delta x'' = (1 + A) x'_c + B x'^3_c + B h^2 x'_c - x'_c$$
$$= Ax'_c + B x'^3_c + B h^2 x'_c = (A + Bh^2) x'_c + B x'^3_c$$
$$= B x' (x'^2 - x'^2_o)$$

$\Delta x''$ est nul pour :

$$x' = 0 \qquad \text{et} \qquad x' = x'_o = \pm \sqrt{-\frac{A}{B} - h^2}$$

Sa dérivée :

$$(\Delta x'')' = A + 3 B x'^2 + B h^2$$

sera nulle pour :

$$x'_{\substack{Max\\min}} = \pm\sqrt{-\frac{A - Bh^2}{3\,B}} = x'_o \frac{\sqrt{3}}{3}.$$

On a alors :

$$\Delta x''_{\substack{Max\\min}} = -\,2\,B\,x'^3_{\substack{Max\\min}}$$

La courbe de correction a même allure que dans le cas précédent : A est seulement remplacé par $A + B\,h^2$; B est le même.

3. Méthode de réduction.

Avec les mesures faites sur les raies d'étalonnage, on construit le graphique :

$$\Delta x'' = f(x'_c)$$

et l'on en déduit : x'_o, x'_{Max}, $\Delta x''_{Max}$, qui permettent de calculer :

$$\alpha = A + B\,h^2 \qquad \text{et} \qquad \beta = B.$$

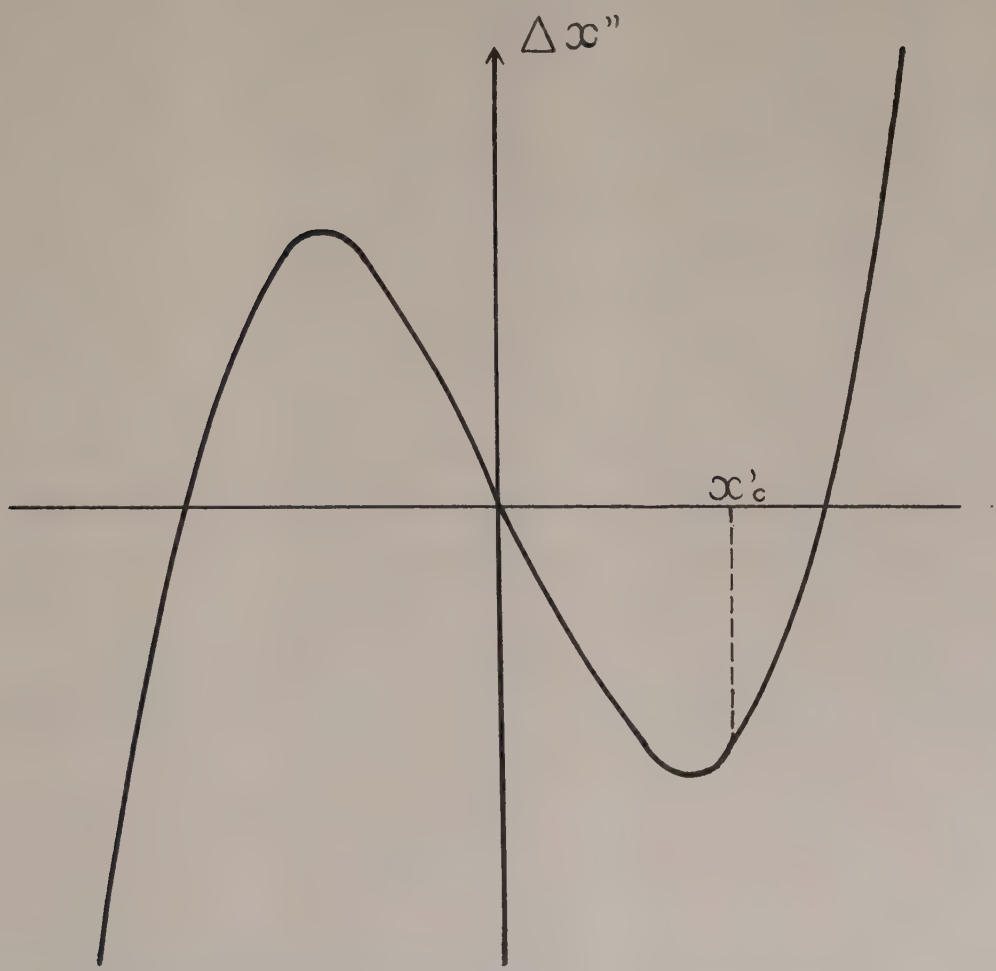


Figure 7 -

L'équation :

$$\Delta x'' = (A + B\,h^2)\,x'_c + B\,x'^3_c = \alpha x'_c + \beta x'^3_c$$

représente la courbe théorique qui correspond au graphique. On la trace point par point, puis on en déduit $\Delta x''$ pour chaque valeur de x'_c correspondant à une raie stellaire mesurée.

Il reste à tenir compte du fait que le spectre stellaire est à une distance δ (et non h comme les raies d'étalonnage) de l'axe des x, ce qui conduit à introduire la correction :

$$\Delta x''' = B\,x'_c\,(\delta^2 - h^2)$$

B, δ et h sont des constantes du cliché ; on a donc une représentation linéaire de cette nouvelle correction.

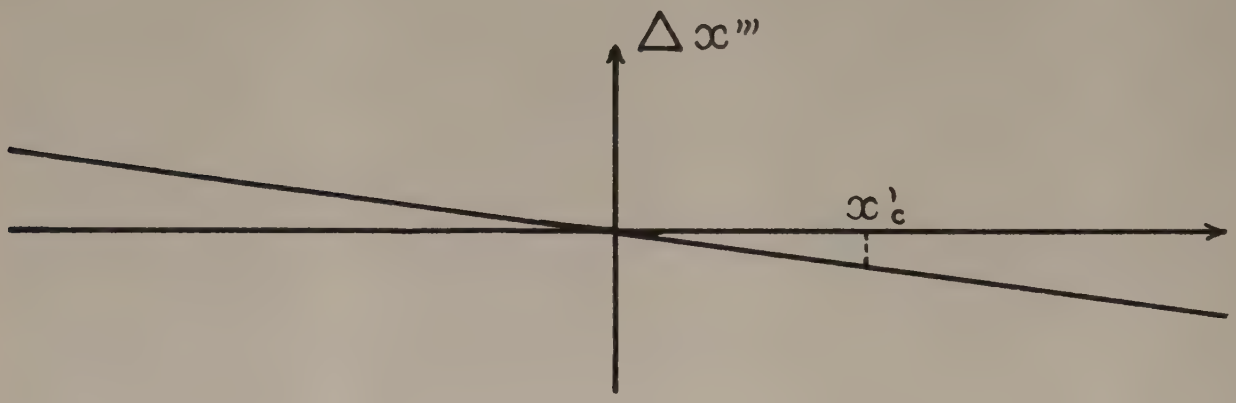


Figure 8 -

En définitive, on aura :

$$\Delta x_{\bigstar} = \Delta x'' + \Delta x'''.$$

Remarques :

a) Pour les clichés bien centrés, ce qui est généralement le cas étant donné la méthode employée pour réaliser la mise au point optique sur la photocathode, on a :

$$\delta = 0.$$

b) Pratiquement, il est inutile de connaître h et δ, si l'on mesure les raies d'étalonnage à égale distance de part et d'autre du spectre de l'étoile. En effet, on a :

$$\Delta x''_1 = (A + B\,h_1^2)\,x'_c + B\,x'^3_c$$

$$\Delta x''_2 = (A + B\,h_2^2)\,x'_c + B\,x'^3_c$$

d'où :

$$\Delta x'' = \left(A + B\,\frac{h_1^2 + h_2^2}{2}\right)x'_c + B\,x'^3_c$$

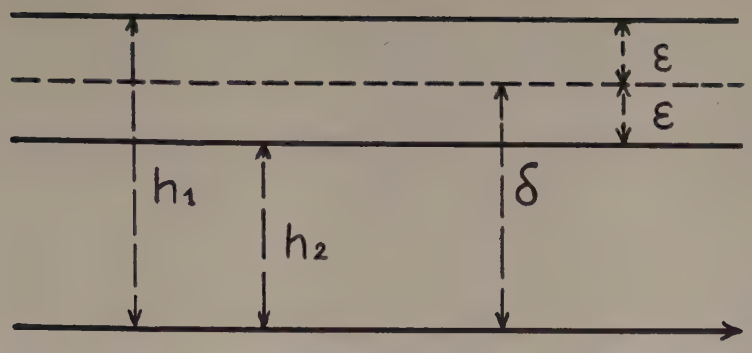


Figure 9 -

Ce sont les coefficients $A + B \frac{h_1^2 + h_2^2}{2}$ et B que l'on détermine graphiquement. De plus :

$$\Delta x''' = B x'_c \ (\delta^2 - \overline{h^2})$$

avec $$\overline{h^2} = \frac{h_1^2 + h_2^2}{2}$$

Mais :

$$\delta^2 - \overline{h^2} = \delta^2 - \frac{(\delta + \varepsilon)^2 + (\delta - \varepsilon)^2}{2} = - \varepsilon^2$$

ε représente la demi-distance entre les deux mesures faites sur les raies d'étalonnage ; c'est une constante. Donc :

$$\Delta x''' = - B\varepsilon^2 \ x'_c$$

est indépendant de δ, donc de la position du spectre par rapport à l'axe des x.

En définitive :

$$\Delta x_{\bigstar} = \Delta x'' + \Delta x'''$$

est donné par la somme de deux nombres lus sur les graphiques 1 et 2, aucun des deux ne nécessitant la connaissance effective de la position de l'axe parallèle à la dispersion passant par le centre optique image.

4. Exemple de réduction.

Cliché n° 1 du 13-8-1961 (Y 142)- NGC 6720 Sud. Toutes les raies d'étalonnage ont été mesurées à l'exception des raies 1, 4, 12 et 18. Déterminons pour chacune d'elles la différence $x''_{mes} - x'_c$, x'_c étant donné par la formule de dispersion moyenne :

$$x'_c - x_o = k_o \lambda \qquad k_o = 0,00260$$

et traçons la courbe $\Delta x'' = f(x'_c)$. On constate immédiatement que la courbe du 3ème degré obtenue :

$$\Delta x'' = \alpha x'_c + \beta x'^3_c$$

a un coefficient α très grand par rapport à β et que, par conséquent, la détermination de ce dernier coefficient sera très imprécise. Il convient pour remédier à cet inconvénient d'utiliser une autre formule de dispersion :

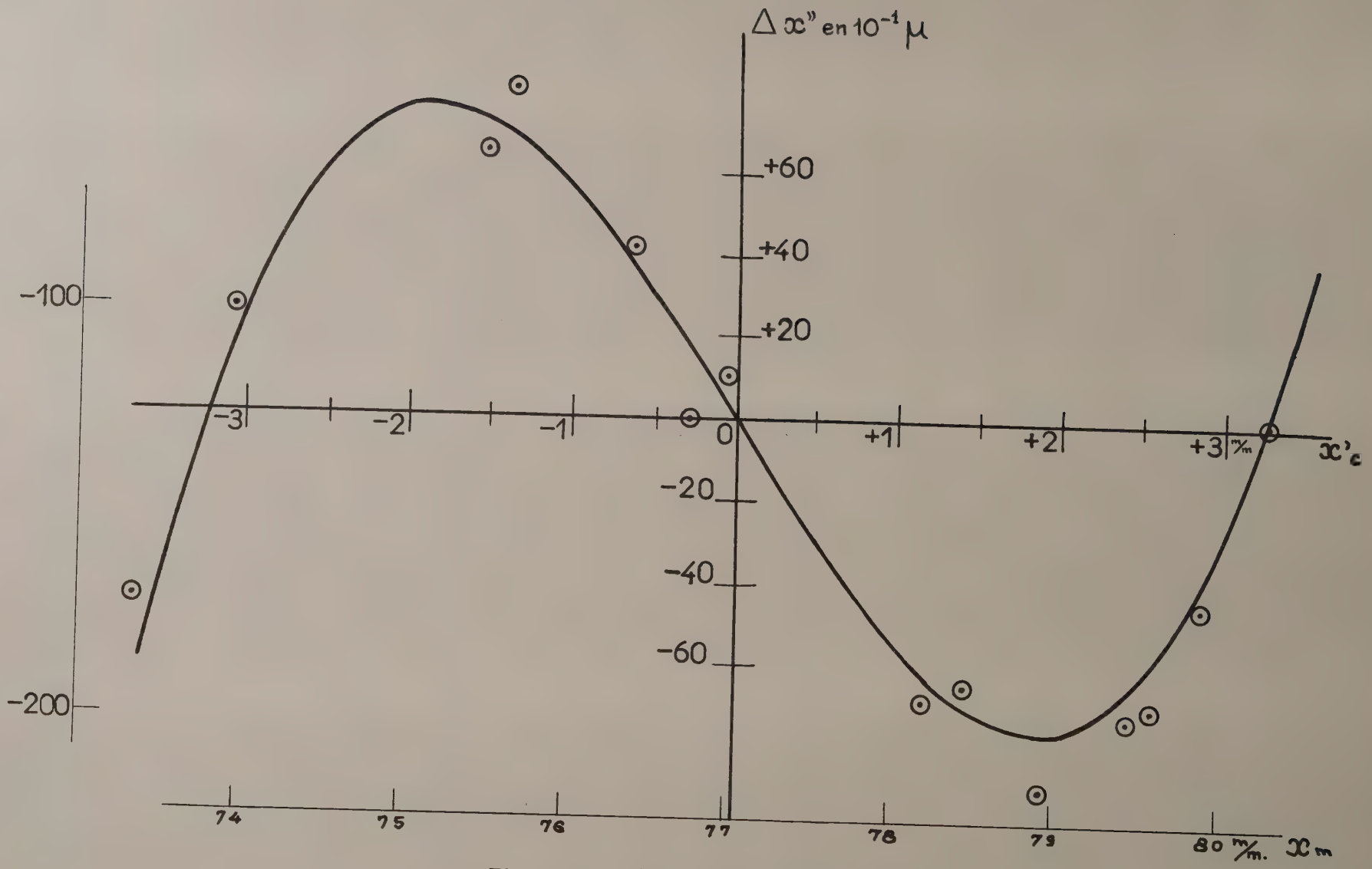


Figure 10 - $\Delta x'' = - 6.08\ x'_c + 0.58\ x'^3_c$.

$$x'_c - x_o = k\lambda$$

qui rendra à la courbe de correction $\Delta x'' = f(x'_c)$ l'allure précédemment décrite.

Pour choisir facilement une valeur convenable de k, on a tracé sur un graphique une série de droites :

$$y = (k - k_o)\lambda .$$

Ceci permet de connaître immédiatement la valeur de k la plus convenable parmi celles qui correspondent aux différentes formules de dispersion calculées. Ici on prendra :

$$k = 0,002568 \qquad \text{(formule D).}$$

Déterminons à nouveau les différences $x''_{mes} - x'_c$ et traçons la courbe $\Delta x'' = f(x'_c)$ qui a cette fois l'allure désirée.

L'examen de cette courbe donne les valeurs de x'_o et $\Delta x''_{Max}$ nécessaires à la détermination des constantes α et β. Pour ce cliché, il vient :

$$x'_o = 3,25 \text{ mm} \qquad \Delta x''_{Max} = 7,6\,\mu$$

d'où l'on déduit :

$$\Delta x'' = - 6,08\, x'_c + 0,58\, x'^3_c .$$

Traçons cette courbe point par point sur papier calque et plaçons-la au mieux parmi les points du graphique. C'est sur cette courbe que l'on lira les valeurs de $\Delta x''$.

Pour tous les clichés, les mesures des raies d'étalonnage ont été faites à des distances égales du spectre de la nébuleuse, de part et d'autre. La valeur de ε^2 est : 0,68. De plus, la position en x' du centre optique C' est connue : son abscisse est la même que celle du centre de la courbe.

Ces données permettent d'avoir immédiatement la correction $\Delta x'''$, lue sur le graphique ci-dessous correspondant à la valeur de B précédemment déterminée :

$$B = \beta = 0,58.$$

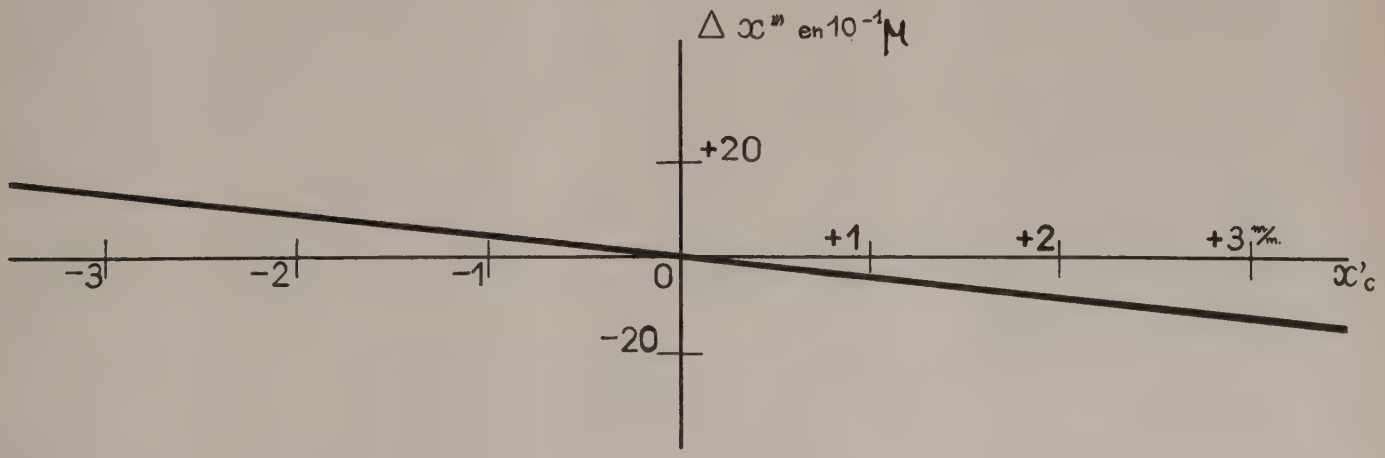


Figure 11 - $\Delta x''' = - Bx'_c \varepsilon^2$

La somme de ces deux corrections :

$$\Delta x_{\bigstar} = \Delta x'' + \Delta x'''$$

pour une valeur de x'_c, correspondant à une raie stellaire, donnera la correction à apporter à la différence $x''_{mes} - x'_c$ obtenue pour cette raie, afin de déterminer sa vitesse radiale.

5. Caractéristiques des constantes k, α et β.

Le coefficient k varie avec la distance focale de tout l'ensemble. Le système de mise au point optique met en évidence des variations importantes de la distance objectif-photocathode, dûes vraisemblablement au positionnement de la photocathode, au montage de l'optique dans le tube ou aux différences d'épaisseur des plaques qui le ferment. Ces variations peuvent atteindre 4/10 de millimètre d'un jour à l'autre, avec le même tube, et justifient le fait que k prenne des valeurs assez différentes pour des manipulations différentes.

Le coefficient α varie également avec la distance de l'ensemble : ce n'est somme toute, qu'une variation différentielle de k. Pour une même manipulation α n'est pas forcément constant, mais peut différer légèrement d'un cliché à l'autre ; ceci est normal. En effet, aussi bien pour le pointage du télescope qu'à cause de la nécessité de remplir les réservoirs Dewar d'air liquide toutes les demi-heures, on est contraint de couper la tension à laquelle l'optique électronique est soumise. Ces opérations ne sauraient se faire dans l'obscurité sans augmenter considérablement les risques de casse, étant donné la complexité du montage (fils d'amenée des diverses tensions, tuyaux de la soufflerie d'air chaud, etc.). Le tube n'est donc sous tension que pour la durée de la pose astronomique. Au début de chacune d'elles, on vérifie que le rapport des tensions positive et négative a bien la valeur correspondant à la bonne mise au point électronique. Mais de très petites variations de ce rapport, indécelables par les instruments de mesures et n'influant pas sur la netteté de l'image, suffisent à changer très légèrement la valeur de α d'un cliché à l'autre. Ceci importe peu ; l'essentiel est que la valeur de ce coefficient ne change pas au cours d'une observation.

Le coefficient de distorsion β apparaît comme bien constant. Si les tout-premiers clichés ont dû être réduits avec une valeur de β différente de la valeur actuelle, depuis 1959 une même valeur numérique convient pour toutes les réductions. Cette différence tient vraisemblablement au fait que les pièces mécaniques de l'optique électronique n'étaient pas, au début, standardisées avec une précision aussi grande qu'actuellement : la triple soudure notamment.

Les déterminations graphiques de β donnent des valeurs qui diffèrent les unes des autres de quantités inférieures à l'erreur faite dans la détermination. Il est donc logique d'adopter une valeur unique pour toutes les réductions ; ce sera :

$$\overline{\beta} = 0,58$$

x étant exprimé en millimètres et Δx en 10^{-1} μ.

B. OBSERVATIONS -

1. Résultats détaillés des observations.

a) Grand spectrographe.

Chambre I : 11 clichés U ; $1\mu \sim 2,4$ km/sec pour Hβ.

Chambre III : 3 clichés W ; $1\mu \sim 1,2$ km/sec pour Hβ.

Nébuleuse	Cliché	V. R.	Nébuleuse	Cliché	V. R.
IC II 1747	U 26	- 72,9	NGC 6891	U 104	+ 42,1
NGC 1501	U 31	+ 33,7	NGC 7662	U 24	- 18,7
NGC 2392	U 180	+ 68,2		U 25	- 14,2
IC II 3568	U 181	- 42,8		U 29	- 14,1
NGC 6210	U 183	- 42,3		U 30	- 18,2
NGC 6572	U 11	- 9,6			
	W 19	- 8,2			
	W 299	- 10,1			
	W 322	- 5,2			

b) Spectrographe E.

47 clichés E ; 1 μ ~ 17 km/sec pour Hβ.

Nébuleuse	Cliché	V. R.	Nébuleuse	Cliché	V. R.
NGC 650-1	E 132	- 36	NGC 6853	E 90	- 70
IC II 1747	E 137	- 79		E 95	- 71
	E 203	- 76		E 198	- 71
NGC 1514	E 185b	+ 66		E 199	- 49
	E 185b	+ 68	NGC 6879	E 88	+ 67
	E 190	+ 39		E 89	+ 79
	E 192	+ 66		E 179	+ 79
	E 202	+ 62		E 180	+ 87
	E 204	+ 71		E 181	+ 57
	E 204	+ 81	NGC 6881	E 88	- 8
IC II 2149	E 137	- 24		E 89	+ 1
	E 190	- 44	NGC 6891	E 182	+ 35
NGC 2371-2	E 132	+ 10		E 183	+ 43
	E 134	+ 29	NGC 7008	E 91	- 75
	E 135	+ 35		E 96	- 64
	E 139	+ 10		E 200	- 68
NGC 2392	E 63	+ 64	IC 1470	E 81	- 57
	E 67	+ 70		E 129	- 67
NGC 6058	E 68	+ 8		E 130	- 76
	E 148	+ 6		E 183	- 52
	E 149	+ 3		E 202	- 75
	E 154	+ 13		E 204	- 86
IC II 4593	E 153	+ 27	NGC 7662	E 184	- 19
NGC 6210	E 76	- 45			

c) Caméra électronique.

74 clichés Y ; 1μ ~ 23 km/sec pour Hβ.

Nébuleuse	Cliché	V. R.	Nébuleuse	Cliché	V. R.
NGC 650-1	Y 181	- 3	NGC 6720	Y 142	- 16
	Y 191	- 31		Y 143	- 26
	Y 192	- 15		Y 157	- 48
	Y 193	- 10		Y 165	- 31
	Y 195	- 36	NGC 6804	Y 133	- 4
	Y 197	- 34		Y 134	+ 7
	Y 198	- 20	NGC 6853	Y 121	- 60
IC II 1747	Y 53	- 52		Y 138	- 52
	Y 178	- 62		Y 139	- 73
	Y 183	- 89		Y 163	- 44
	Y 194	- 85		Y 164	- 48
	Y 201	- 78	NGC 6891	Y 77	+ 52
	Y 206	- 90		Y 78	+ 42
NGC 1514	Y 54	+ 72		Y 84	+ 64
	Y 202	+106		Y 85	+ 30
	Y 207	+ 95		Y 102	+ 46
NGC 2371-2	Y 51	+ 29	NGC 7008	Y 123	- 90
	Y 52	+ 17		Y 140	- 78
	Y 55	+ 11		Y 145	- 86
NGC 2392	Y 50	+ 88		Y 146	-105
NGC 3587	Y 47	+ 3		Y 155	- 75
NGC 6058	Y 80	0		Y 159	- 74
	Y 132	+ 3		Y 168	- 81
IC II 4593	Y 41	+ 30		Y 189	- 76
NGC 6210	Y 19	- 42		Y 190	- 78
	Y 24	- 21		Y 209	- 80
	Y 25	- 22	NGC 7027	Y 144	+ 13
	Y 28	- 45	IC 1470	Y 161	- 71
	Y 42	- 33		Y 162	- 83
	Y 64	- 40		Y 176	- 75
	Y 66	- 32		Y 205	- 61
	Y 67	- 43	NGC 7662	Y 137	- 23
NGC 6720	Y 82	- 8		Y 147	- 1
	Y 83	- 3		Y 160	- 8
	Y 118	- 19		Y 169	- 19
	Y 119	- 27		Y 174	+ 3
	Y 135	- 23		Y 175	- 6

2. Poids des observations.

Déterminons le poids que l'on doit attribuer à chaque catégorie de clichés.

Soit $\overline{v}$ la vitesse radiale moyenne correspondant à une sorte de clichés pour une nébuleuse, et $v_i - \overline{v}$ les écarts à la moyenne $\overline{v}$. Pour toutes les nébuleuses, on aura :

$$\varepsilon^2 = \frac{\Sigma (v_i - \overline{v})^2}{n}$$

n, nombre de mesures considérées.

σ représente l'erreur quadratique moyenne sur une observation. Le poids p d'une observation sera proportionnel à $\frac{1}{\sigma^2}$.

Pour les clichés Y :

$n = 74 \qquad \sigma^2 = 150 \qquad \sigma = 12,2 \qquad p = 0,0067\ k$

Pour les clichés E :

$n = 74 \qquad \sigma^2 = 90 \qquad \sigma = 9,5 \qquad p = 0,0111\ k$

k = Cste. On posera, par définition, qu'un cliché Y a le poids unité. L'erreur sur une mesure de vitesse radiale de poids p = 1 sera :

$$\sigma = \pm 12,2 \text{ km/sec.}$$

En arrondissant la valeur de p trouvée pour les clichés E d'une part, et en évaluant celles qui correspondent aux clichés U et W trop peu nombreux d'autre part, on affectera chaque catégorie d'un poids égal à :

1 pour les clichés Y
1,5 pour les clichés E
6 pour les clichés U
9 pour les clichés W.

3. Résultats généraux des observations de vitesses radiales.

Les vitesses radiales moyennes des nébuleuses planétaires observées sont données dans le tableau ci-après.

Comme le mentionnait une publication partielle antérieure [22], ces résultats mettent en évidence la possibilité d'utiliser la photographie électronique pour les déterminations de vitesses radiales ; en effet, les mesures que l'on peut faire sur de tels clichés sont généralement en bon accord avec celles effectuées sur des clichés ordinaires.

Remarques :

- Il semble que pour les nébuleuses NGC 1514 et IC 1470 aucune mesure de vitesse radiale n'ait été publiée jusqu'à ce jour.

- Une nébuleuse NGC 6879 montre un désaccord important :

Wilson : + 7,1 O. H. P. : + 73,9

Il est douteux que cet écart soit dû à une erreur d'impression dans la publication de l'observatoire de Lick [23] d'où proviennent les seules mesures antérieures aux nôtres. Toutefois, bien que les valeurs que nous avons obtenues pour cette vitesse soient assez concordantes, une confirmation est nécessaire ; elle sera effectuée dès que possible.

N° Nébuleuse	V. R.	Poids	n	V. R. (Wilson)
NGC 650-1	- 23,9	8,5	8	- 23,6
IC II 1747	- 75,1	15,0	9	- 62,7
NGC 1501	+ 34,0	6,0	1	+ 36,9
NGC 1514	+ 70,6	13,5	10	
IC II 2149	- 34,0	3,0	2	- 33,6
NGC 2371-2	+ 20,3	9,0	7	+ 21
NGC 2392	+ 69,8	10,0	4	+ 84,2
NGC 3587	+ 3	1,0	1	+ 8
IC II 3568	- 43,0	6,0	1	- 39,9
NGC 6058	+ 6,0	8,0	6	+ 1
IC II 4593	+ 28,2	2,5	2	+ 22,0
NGC 6210	- 38,7	15,5	10	- 35,6
NGC 6572	- 8,1	33,0	4	- 8,7
NGC 6720	- 22,3	9,0	9	- 19,1
NGC 6804	+ 1,5	2,0	2	- 13
NGC 6853	- 60,7	11,0	9	- 42
NGC 6879	+ 73,9	7,5	5	+ 7,1
NGC 6881	- 3,5	3,0	2	- 15
NGC 6891	+ 43,1	14,0	8	+ 42,1
NGC 7008	- 78,3	14,5	13	- 73
NGC 7027	+ 13	1,0	1	+ 8,9
IC 1470	- 69,8	13,0	10	
NGC 7662	- 15,0	31,5	11	- 12,2

n, nombre de clichés de la nébuleuse considérée ;
V. R. (Wilson), vitesse radiale donnée par la catalogue de Wilson [21].

C. APPLICATION A L'ETUDE DES MOUVEMENTS GALACTIQUES -

1. Mouvement du Soleil.

A partir de ces observations de vitesses radiales, on peut déterminer le mouvement du Soleil : grandeur de sa vitesse S et coordonnées équatoriales de l'apex A et D.

Dans le système de coordonnées galactiques, les composantes de la vitesse du Soleil sont :

$$\xi_o = S \cos A \cos D$$
$$\eta_o = S \sin A \cos D$$
$$\zeta_o = S \sin D$$

Si l'on utilise les coordonnées équatoriales, on aura, pour chacune des nébuleuses (α, δ) considérées :

$$\xi_o \cos \alpha \cos \delta + \eta_o \sin \alpha \cos \delta + \zeta_o \sin \delta - V = - \rho$$

ρ, vitesse propre de la nébuleuse.

La méthode des moindres carrés appliquées à ces 23 équations conduit, à :

$$\xi_o = - 14,68 \qquad \eta_o = + 15,58 \qquad \zeta_o = - 18,04$$

d'où l'on tire :

$$S = - 28 \text{ km/sec} \qquad A = 313° \qquad D = + 40°$$

Cet ensemble de valeurs est assez éloigné de celui que donne l'étude des étoiles voisines du Soleil :

$$S = - 19,5 \text{ km/sec} \qquad A = 270° \qquad D = + 30°,$$

mais il correspond assez bien avec les déterminations des différents auteurs qui utilisent les nébuleuses planétaires. Campbell et Moore [23] considèrent 96 objets, admettent les coordonnées de l'apex et trouvent : S = - 29,6 km/sec. Plus récemment, O'Dell [24] donne :

$$S = - 30 \text{ km/sec} \qquad A = 299° \qquad D = + 41°$$

Etant donné le petit nombre de nébuleuses utilisées ici, les valeurs données plus haut sont en accord satisfaisant avec cette dernière détermination.

2. Rotation galactique.

Pour chaque nébuleuse, corrigeons les vitesses radiales mesurées de la composante dûe au mouvement du Soleil vers l'apex, soit :

$$S \cos d = S \left[\sin D \sin \delta + \cos D \cos \delta \cos(\alpha - A)\right] ;$$

d est la distance angulaire de la nébuleuse à l'apex du Soleil.

On peut exprimer le fait que chaque nébuleuse participe au mouvement de rotation galactique par l'équation :

$$V' = A\, r \cos^2 b. \sin 2 (l - l_o) + \rho'$$

que l'on peut encore mettre sous la forme :

$$V' = A\, r \cos^2 b \left[\sin 2l \cos 2l_o - \cos 2l \sin 2l_o\right] + \rho'$$

V' = V - S cos d, vitesse radiale de la nébuleuse corrigée du mouvement du Soleil,

l, b, coordonnées galactiques de la nébuleuse

l_o, longitude du centre galactique

A, constante de Oort

ρ', vitesse particulière de la nébuleuse.

Nous nous proposons de déterminer l_o et A en adoptant différentes valeurs numériques.

a) Vorontsov-Velyaminov [25] donne les distances des nébuleuses planétaires au Soleil. Prenons comme valeurs de S, A, D celles obtenues en considérant les étoiles proches du Soleil, et appliquons la méthode des moindres carrés aux 23 équations en V'. Il vient, après élimination de deux nébuleuses : NGC 2392 et NGC 6853 pour lesquelles r est petit et V' grand :

$$A = + 0,018 \text{ km/sec/parsec} \qquad l_o = 341°.$$

b) Appliquons toujours la même correction aux vitesses V, mais utilisons les distances r déterminées par O'Dell. On est conduit à supprimer les nébuleuses NGC 1514 et NGC 6853 pour lesquelles V'/r est très grand. Les valeurs de A et l_o déduites de ce calcul sont alors :

$$A = + 0,024 \text{ km/sec/parsec} \qquad l_o = 320°.$$

c) Corrigeons maintenant les vitesses V de la composante dûe au mouvement du Soleil vers l'apex précédemment déterminé à l'aide des 23 nébuleuses planétaires observées ; et reprenons les valeurs de r données par Vorontsov-Velyaminov. La méthode des moindres carrés, après élimination de deux nébuleuses (voir a), conduit aux valeurs :

$$A = + 0,012 \text{ km/sec/parsec} \qquad l_o = 342°.$$

d) En appliquant la même correction à V, et en utilisant les valeurs de r données par O'Dell, on trouve pour la constante de Oort et la longitude du centre galactique les valeurs :

$$A = + 0,020 \text{ km/sec/parsec} \qquad l_o = 330°.$$

C'est ce dernier système de valeurs qui se rapproche le plus de celui habituellement adopté pour ces deux constantes :

$$A = + 0,020 \text{ km/sec/parsec} \quad \text{et} \quad l_o = 325°.$$

3. Terme K.

Le terme K est un terme supplémentaire de l'équation V' considérée au paragraphe précédent, destiné à tenir compte éventuellement d'influences systèmatiques sur les vitesses radiales ; il peut provenir des propriétés cinématiques du groupe d'objets étudiés ou d'erreurs systèmatiques. Bien qu'il n'ait pas reçu de signification physique certaine, nous allons l'introduire et déterminer sa valeur.

L'équation considérée pour la rotation galactique devient :

$$V' = K + A\, r \cos^2 b. \sin 2 (l - l_o) + \rho'.$$

Dans le paragraphe précédent, A et l_o ont été déterminés en supposant K nul. Posons maintenant $K \neq 0$, dans les divers cas envisagés et appliquons la méthode des moindres carrés au système d'équations V'. Il vient :

pour le cas a)	K = 5	A = + 0,019	l_o = 319°
pour le cas b)	K = 3	A = + 0,025	l_o = 319°
pour le cas c)	K = 8	A = + 0,012	l_o = 330°
pour le cas d)	K = 6	A = + 0,021	l_o = 329°.

En définitive, on peut adopter les valeurs moyennes :

$$K = 5 \qquad A = + 0,019 \text{ km/sec/parsec} \qquad l_o = 324°$$

pour la quantité K, la constante de Oort et la longitude du centre galactique. Il faut toutefois signaler que la valeur de K est de l'ordre de grandeur de l'erreur commise sur cette quantité (± 5 km/sec) et que sa réalité est donc tout à fait contestable. L'adoption de K = 0 modifierait peu la valeur numérique moyenne de l_o (l_o = 333°) et ne changerait pas celle de A.

Remarque :

Les nébuleuses NGC 1514, NGC 2392, NGC 6853 qui doivent être supprimées lorsque l'on applique la méthode des moindres carrés à la détermination des constantes galactiques, sont, d'après Vorontsov- Velyaminov ou O'Dell suivant le cas, à des distances r très petites par rapport à la majorité des autres. Mais, étant donné l'imprécision avec laquelle r est déterminé, il faut se garder d'une conclusion trop hâtive.

Terminons en précisant que l'étude du mouvement d'ensemble de 23 objets n'a évidemment pas un grand poids statistique et qu'il ne faut pas surévaluer les résultats. Ceux-ci montrent seulement que les nébuleuses planétaires utilisées dans ce travail participent, en moyenne, assez bien à la rotation galactique ; ils ne mettent en évidence aucun mouvement de groupe.

CHAPITRE IV

SPECTROPHOTOMÉTRIE DES NÉBULEUSES PLANÉTAIRES

A. METHODE DE REDUCTION DES OBSERVATIONS -

Une des caractéristiques des plaques nucléaires est la linéarité de leur courbe de noircissement : cet effet, particulièrement intéressant dans les travaux de spectrophotométrie, méritait d'être exploité ; mais un problème se posait : celui d'imprimer sur chaque petite plaque utilisée, un étalonnage valable pour des mesures d'intensités de raies spectrales. L'espace disponible sur la plaque nucléaire est approximativement un rectangle de 18 mm sur 8, à l'intérieur duquel se trouve, plus ou moins bien centrée, l'image de l'objet formé sur la photocathode, image qui a des dimensions très voisines de 13 mm sur 4. Il reste donc fort peu de place pour y imprimer quoique ce soit. Nous avons donc décidé d'utiliser, à cet effet, l'étalonnage Pd-Ne habituellement réservé à des mesures comparatives de longueur d'onde ; ce procédé s'est révélé parfaitement valable moyennant quelques précautions, notamment celle de la sélection des raies utilisées.

1. Détermination des intensités des raies du palladium et du néon.

Un travail préliminaire consiste à choisir les raies, puis à déterminer les intensités de celles qui seront utilisées. Dans ce but, plusieurs clichés ont été pris avec le spectrographe E sur plaques 103 aF. Chacun d'eux comprend : un étalonnage en longueur d'onde Pd-Ne encadrant le spectre d'une étoile bien connue au point du vue énergétique, et un étalonnage photométrique Hg-Cd réalisé avec le photomètre à pénombre de Soleillet, modifié par Barbier [26].

Deux étoiles de type peu avancé :

59 Cyg	$\alpha_{50} = 20^h\ 58^m$	$\delta_{50} = +47°\ 19'$	B 0
π^2 Cyg	$\alpha_{50} = 21^h\ 45^m$	$\delta_{50} = +49°\ 05'$	B 3

ont été observées indifféremment. Les spectres étaient pris avec un angle horaire voisin de 0 de façon à avoir une absorption minimum ; et, comme ce sont des étoiles de type B, le fond continu du spectre est bien déterminé. Pour une longueur d'onde moyenne : $\overline{\lambda} = 4250$ A, Chalonge [27] donne pour ces deux étoiles des gradients respectivement égaux à : $\varphi_1 = 1,02$ et $\varphi_2 = 0,86$, ce qui correspond à des températures de couleur de 16100° et 20900°, si l'on assimile ces objets au corps noir. On peut alors calculer par la formule de Planck :

$$E = C_1\ \lambda^{-5}\ (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1}$$

les valeurs théoriques relatives, pour différentes longueurs d'onde, de l'intensité du spectre continu de l'étoile considérée. Comparées aux valeurs observées de E (enregistrement au microphotomètre et réduction grâce à l'étalonnage au Soleillet), on peut construire la courbe donnant le coefficient de correction instrumentale : k.

Dans le spectre d'étalonnage Pd-Ne, certaines raies ont été sélectionnées expérimentalement : d'abord par élimination des raies "blend" après étude du spectre à plus grande dispersion, puis au cours de ce travail par élimination des raies d'intensité variable. Pour les raies conservées, les intensités relatives peuvent être déterminées facilement ; on a, en effet :

$$k.I_{mes} = I_{vrai}$$

d'où I_{vrai} pour ces raies. Plusieurs séries de mesures, dont on considère la moyenne, déterminent les intensités suivantes pour les raies qui nous serviront maintenant d'étalonnage photométrique.

Raie	λ	I_{vrai}	Raie	λ	I_{vrai}
1	3894	1,51	17	5619	0,84
2	3959	1,57	18	5740	0,28
3	4087	0,57	19	5770	0,07
4	4170	0,22	20	5853	1,22
5	4474	0,31	21	5882	0,52
6	4788	0,27	22	5945	0,88
7	4818	0,47	23	6030	0,25
8	4875	0,40	24	6074	0,80
9	4920	0,14	25	6143	1,77
10	5063	0,11	26	6217	0,50
11	5111	0,86	27	6305	0,51
12	5164	1,06	28	6334	1,91
13	5235	0,34	29	6402	5,27
14	5296	1,33	30	6507	2,44
15	5395	0,51	31	6599	0,94
16	5543	0,82	32	6678	1,36

L'étalement des valeurs de I ainsi obtenues assure une bonne échelle de calibration photométrique des clichés.

2. Remarques sur la méthode employée.

a) Les étalonnages avec le palladium et avec le néon sont effectués indépendamment l'un de l'autre. Les 18 premières raies appartiennent au palladium, les 14 autres au néon. On a donc, en réalité, deux échelles d'intensité indépendantes : l'une pour la région bleue jusqu'à λ = 5750 A, l'autre au-delà de cette longueur d'onde pour le rouge. Nous verrons par la suite comment s'effectue le raccordement.

b) Les intensités de 27 raies seulement ont été déterminées par ce procédé ; les autres ont été ajoutées ultérieurement. Par suite des variations importantes de la sensibilité des plaques 103 aF avec la longueur d'onde, ces raies étaient soit trop fortes, soit trop faibles pour être mesurées avec précision.

c) Dans cette méthode de réduction, la comparaison des intensités d'un spectre continu et de raies d'émission à la même longueur d'onde peut sembler sujet à caution. Mais cette façon de procéder est correcte :

En effet, [28] si Δx est la largeur de l'image analysée, $u(\lambda)$ la dispersion du spectrographe et $E(\lambda)$ l'éclat stellaire pour la longueur d'onde λ, le flux mesuré pour le spectre continu est proportionnel à $\int E(\lambda)\, d\lambda$ que l'on peut assimiler à $E(\lambda).\Delta\lambda$. On a :

$$E(\lambda).\Delta\lambda = E(\lambda).u(\lambda).\Delta x.$$

Pour une raie d'étalonnage, l'image est monochromatique ; le flux est proportionnel à $E'(\lambda).\Delta x$. Le rapport cherché est donc :

$$\frac{E'(\lambda)}{E(\lambda).u(\lambda)} = k\frac{E'(\lambda)}{E(\lambda)}$$

Les éclairements sont comparables sans correction ; seul un facteur constant entre en jeu, puisque le système dispersif est un réseau ($u(\lambda)$ = Cste).

d) On pourrait objecter également la grande différence qui existe entre les temps de l'étalonnage et de l'objet étudié ; Becker et Kipphan, entre autres, [29] ont montré que les plaques exposées aux électrons obéissaient à la loi de réciprocité, donc, la calibration utilisant une source intense et une durée de pose courte est tout à fait valable.

3. Dépouillement des clichés de la caméra électronique.

Pour des nébuleuses planétaires de petit diamètre apparent, les spectres obtenus avec la caméra électronique ont un aspect filiforme et sont, de ce fait, difficilement exploitables avec le microphotomètre Chalonge tel qu'il est construit. Quelques modifications lui ont été apportées pour l'adapter au dépouillement de nos clichés. L'optique du microscope supérieur a été remplacée par un objectif de microscope BBT à plus fort grossissement : × 20 de manière à projeter sur la fente exploratrice une image plus agrandie de l'objet à étudier. Mais alors, l'éclairement donné par la lampe photométrique devient insuffisant et la brillance superficielle de la plage considérée cesse d'être uniforme. Pour retrouver une plage uniforme et d'intensité convenable, la lampe d'origine a été remplacée par une lampe de projection 6 volts, 5 ampères du type utilisé pour la lecture des bandes sonores de cinéma et dont le filament spiralé est très ramassé sur lui-même. Cet ensemble permet de prospecter une très petite partie du cliché, tout en restant dans les conditions normales de fonctionnement de l'appareil.

Trois enregistrements ont alors été faits sur chaque cliché ; successivement un sur la partie supérieure du spectre d'étalonnage, un (ou plusieurs parfois) sur la nébuleuse et un dernier sur la partie inférieure du spectre d'étalonnage. Les mesures habituelles de densité :

$$d = \log y_o - \log y$$

sont effectuées sur les enregistrements.

4. Réduction des mesures.

La linéarité de la courbe de noircissement des plaques exposées aux électrons se traduit par cette loi simple :

$$d = a.n_e$$

"La densité en un point est proportionnelle au nombre n_e d'électrons qui arrivent en ce point de la plaque" ; a est le rendement quantique de la plaque nucléaire. Or :

$$n_e = k_{\lambda,x}.E$$

$k_{\lambda,x}$ est un facteur qui peut dépendre de la longueur d'onde et de la position du point considéré de la photocathode. Pour une bonne photocathode, assez uniforme, on aura :

$$k_{\lambda,x} = k_\lambda$$

le coefficient k_λ ne dépend pas du point de la photocathode où se forme l'image. On peut encore poser :

$$k_\lambda = k . \rho$$

k étant une constante qui évalue le rendement quantique de la photocathode et ρ en est son rendement spectral. Nous reviendrons ultérieurement sur cette grandeur.

Finalement, il vient :

$$d = a k \rho E = K \rho E.$$

Vernier [2] a confirmé ce résultat pour les très faibles intensités. Pour des intensités moyennes (mesurables par les procédés ordinaires et non par comptage de grains), une vérification a été faite de la manière suivante : sur 10 clichés, une partie des raies d'étalonnage seulement était supposée connue. Les intensités des autres ont été déterminées comme s'il s'agissait de raies nébulaires ; les résultats sont satisfaisants. Ajoutons que c'est par ce procédé que nous avons pu adjoindre cinq nouvelles valeurs aux intensités des 27 raies du palladium et du néon déjà connues.

Si E est la différence entre l'intensité du signal et celle du bruit, on a enfin :

$$\log y_o - \log y = K \rho E.$$

En réalité, c'est E à un facteur près que nous avons déterminé précédemment, puisque : $E = I t$.

Cette équation, appliquée à chacune des raies de l'étalonnage Pd-Ne, permettra d'obtenir la courbe de rendement spectral de la photocathode ; celle-ci nous sera nécessaire pour la détermination des intensités des raies nébulaires.

5. Rendement spectral des photocathodes.

La courbe de rendement spectral : $\rho = f(\lambda)$ est caractéristique d'une photocathode et doit être déterminée pour chacune d'elles. Nous nous servirons pour cela des spectres d'étalonnage de tous les clichés obtenus avec cette photocathode (en général 16 si l'on considère les parties inférieure et supérieure de chaque cliché). Pour chaque raie, log y et log y_o, correspondant au signal et au bruit, ont été directement mesurés sur les enregistrements faits au microphotomètre. La différence représente la densité du cliché en ce point.

D'autre part, nous avons vu que les valeurs de E constituaient deux échelles indépendantes pour le palladium et le néon, la coupure se produisant entre les raies 18 et 19 : λ 5740 et λ 5770. Or, il est bien évident que sur un si petit intervalle de longueur d'onde, le coefficient ρ ne peut prendre des valeurs très différentes. Ce critère servira à effectuer le raccordement des deux échelles d'intensités et nous choisirons arbitrairement les valeurs relatives de K (K_1 pour le palladium, K_2 pour le néon) telles que, pour chaque cliché :

$$\rho_{18} = 1,06 \qquad \rho_{19} = 1,04$$

valeurs obtenues par l'expérience, en prenant $\rho_{20} = 0,80$.

K_1 et K_2 étant ainsi déterminés, le rapport $\overline{(\log y_o - \log y)/KE}$ donne point par point la valeur de ρ pour la photocathode considérée. La courbe $\rho = f(\lambda)$ a l'allure ci-dessous.

70

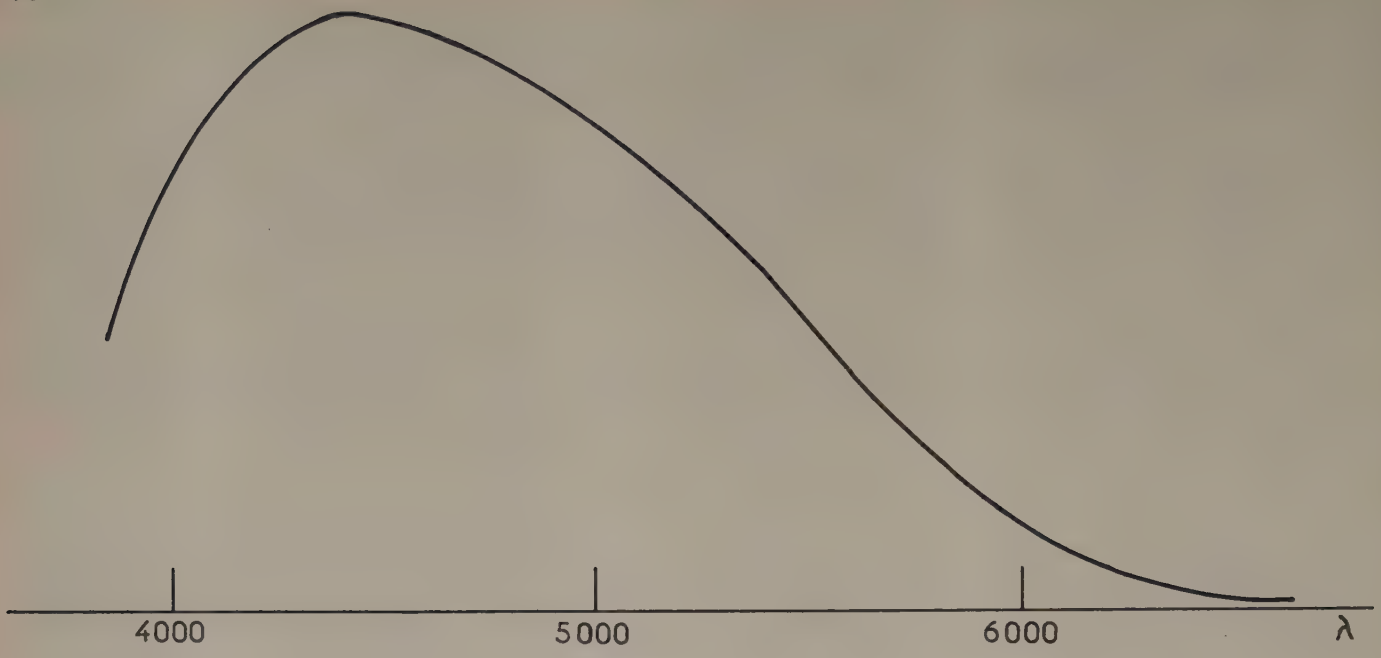


Figure 12 - $\rho = f(\lambda)$.

On trouve un maximum vers λ 4300-4500 A. Vers les longueurs d'onde supérieures, la courbe descend lentement et d'une façon à peu près linéaire jusqu'à environ 6000 A ; alors, elle s'incurve pour se rapprocher petit à petit de la valeur 0 qu'elle atteint au-delà de 6800 A. Du côté des courtes longueurs d'onde ($\lambda < \lambda_{Max}$) la courbe descend, en général, plus rapidement jusqu'à λ 3900 A (dernière valeur mesurée).

En réalité, la courbe $\rho = f(\lambda)$ ne représente pas le rendement spectral pur de la photocathode, mais le rendement spectral de l'ensemble instrumental spectrographe-photocathode. C'est pour cette raison que la courbe ρ chûte assez rapidement à partir de λ 4300 environ : la décroissance du coefficient de transmission du réseau coïncidant alors avec la décroissance du rendement spectral de la photocathode. Les deux courbes ci-dessous donnent une idée de la part de chaque effet ; elles représentent le coefficient de transmission du réseau travaillant en diffraction normale pour λ 5200 ($i = 9°$) et une courbe moyenne de rendement spectral d'une cathode Cs-Sb du type de celles que nous utilisons.

La figure suivante représente les variations en sensibilité spectrale de quelques ensembles instrumentaux qui diffèrent seulement par les photocathodes : elle montre bien la nécessité d'étudier individuellement chaque couche sensible.

Cette diversité a été également mise en évidence d'une manière différente, avant d'entreprendre ce travail :

Si, pour quelques clichés, on construit les courbes $d = f(\overline{d})$, on constate que, pour les raies du palladium , les points relatifs à un même cliché s'alignent assez bien sur une droite, alors que cela ne se produit pas pour les raies du néon. Ceci prouve le peu de dispersion, autour de la moyenne des mesures effectuées dans la région bleue et donc la ressemblance des courbes de rendement spectral des photocathodes dans cette même région (à un facteur près), et par opposition les différences qui existent entre elles dans la région rouge.

Pour terminer, il est utile de remarquer que la dispersion des points autour de la courbe $\rho = f(\lambda)$ provient, outre les erreurs de mesure : 1) des défauts d'homogénéité des couches sensibles utilisées, et 2) des défauts des plaques, dont la couche de gélatine est extrêmement fragile ; ces défauts sont facilement décelables, mais ne peuvent être corrigés : ils conduisent simplement à la suppression de la mesure correspondante.

Nous avons également remarqué que, en général, la diminution de la sensibilité de la cellule avec le temps (si elle se produit) ne dépend pas de la longueur d'onde considérée de manière importante. Mais pour une série de photocathodes un amoindrissement de la sensibilité, plus appréciable

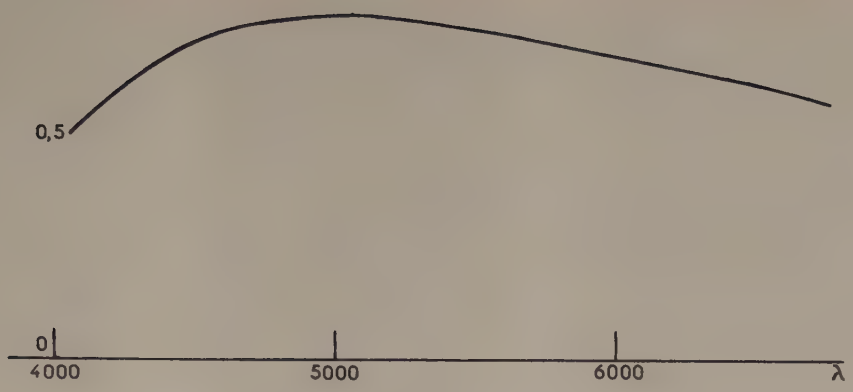


Figure 13 - Courbe de transmission du réseau.

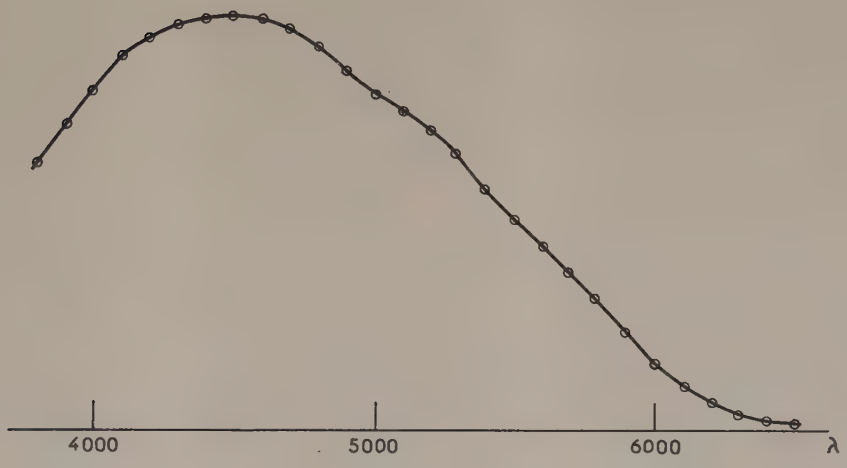


Figure 14 - Courbe de sensibilité spectrale d'une cathode Cs-Sb.

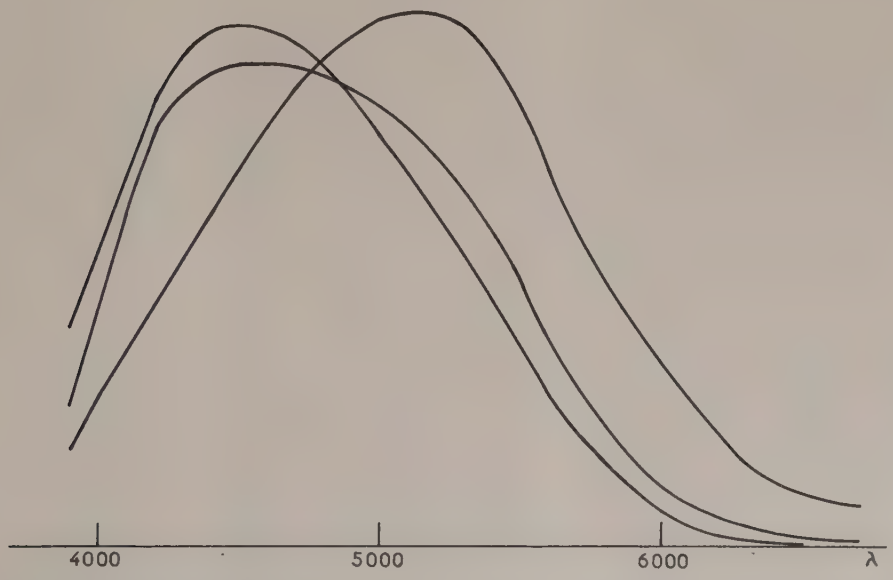


Figure 15 - Courbes expérimentales $\rho = f(\lambda)$ avec différentes photocathodes.

dans le rouge que dans le bleu, a rendu à la fois plus difficiles et moins précises les mesures effectuées : il faut alors construire la courbe de rendement spectral pour chaque cliché et les défauts des plaques ne s'éliminent plus. Nous n'avons utilisé ces mesures que lorsque nous ne disposions pas d'autres spectres.

6. Détermination des intensités des raies nébulaires.

La mesure de la densité de l'image d'une raie nébulaire monochromatique en émission se fait sur les enregistrements obtenus avec le microphotomètre Chalonge ; la valeur du facteur ρ relatif à chaque longueur d'onde se lit sur la courbe précédemment tracée, et le rapport de ces deux quantités, soit :

$$\frac{d_{mes}}{\rho}$$

donne I à un facteur près, qui est le même pour tout un cliché.

Chaque fois qu'il sera possible, ce facteur sera déterminé en choisissant arbitrairement 100 pour l'intensité de la raie Hβ. Si celle-ci est surexposée, c'est Hγ = 50 qui sera pris pour unité ; puis, par la suite, il sera possible de ramener ces mesures à la même échelle que les autres. Les valeurs de I définitives sont donc toutes données par rapport à Hβ = 100.

7. Absorption atmosphérique différentielle.

Signalons tout d'abord que les clichés ont toujours été pris assez haut sur l'horizon, puisque, sur une centaine de spectres utilisés, 5 seulement ont une valeur de sec z supérieure à 1,30 (< 1,40). Ceci justifie l'emploi d'une valeur moyenne pour la constante K que nous allons définir.

Si l'on exprime les intensités observées en magnitudes, la correction d'absorption atmosphérique est représentée par : k sec z. Le coefficient k est la somme d'un terme théoriquement proportionnel à λ^{-4} et d'un terme constant, celui-ci différant d'ailleurs suivant la transparence de l'atmosphère. Pour l'Observatoire de Haute-Provence, la courbe moyenne représentant $k = f(\lambda)$ a été déterminée expérimentalement par P. Mianes [30] ; elle coïncide assez bien avec la courbe théorique :

$$k = k_o + k_1 \lambda^{-4}$$

où : $k_o = 0,10$ et $k_1 = 0,0090$;

la valeur de k_1 est en bon accord avec celle donnée par J. Dufay [31]. Nous adopterons donc, pour le coefficient d'absorption atmosphérique, les valeurs prises sur la courbe expérimentale que nous allons transformer pour plus de commodité. En effet, les mesures que nous avons effectuées sont données directement en intensité et de plus, elles sont rapportées à $H_\beta = 100$. Pour respecter ce système, la correction différentielle à apporter à I sera un coefficient :

$$10^{-0,4 \Delta k \sec z} = K^{\sec z}$$

avec : $\Delta k = k(\lambda) - k(4861)$.

La courbe de la figure 16 représente : $K = f(\lambda)$.

On aura alors pour l'intensité hors de l'atmosphère :

$$I_{h.a} = \frac{I_{obs}}{K^{\sec z}}$$

Chaque valeur de I est corrigée par ce procédé.

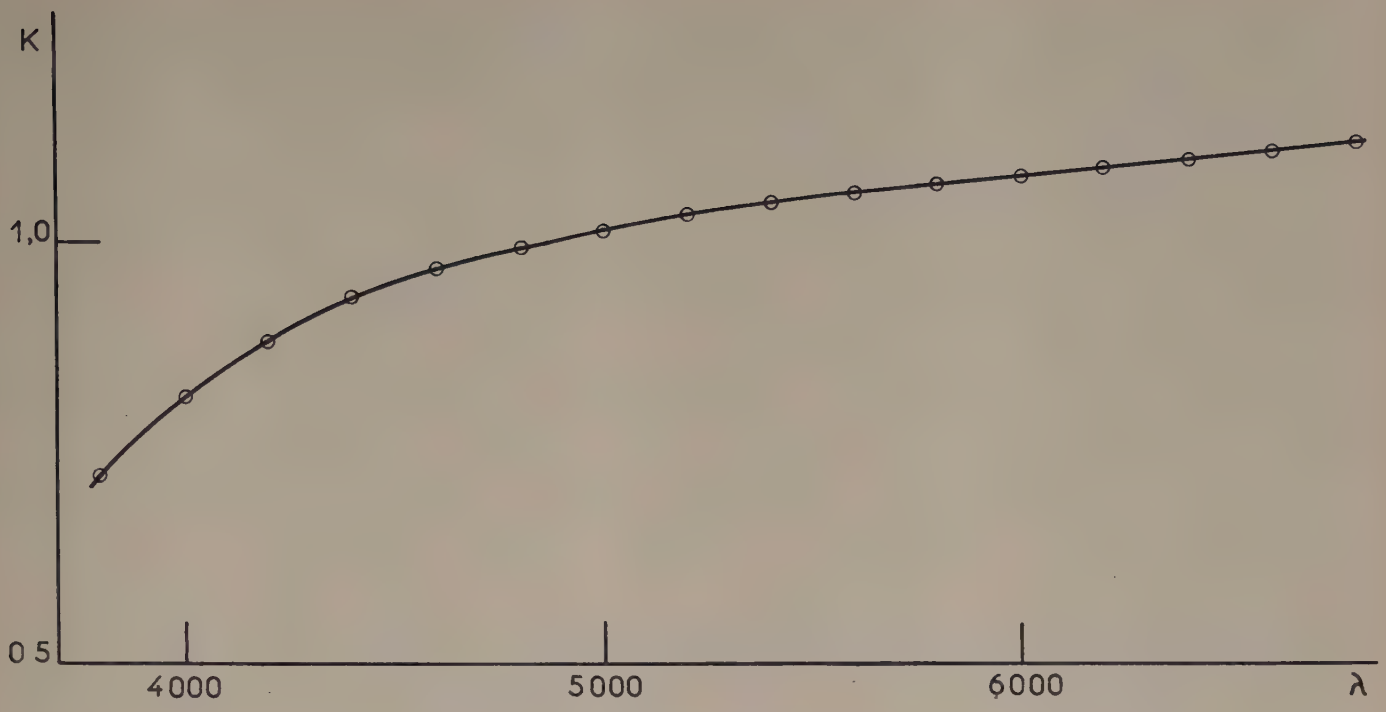


Figure 16 - K = f(λ).

8. Rougissement interstellaire.

Plusieurs observateurs ont déjà constaté que les valeurs des intensités des raies de l'hydrogène ne correspondent pas bien avec les valeurs données par la théorie et en ont rendu responsable le rougissement interstellaire. Nous allons déterminer pour chaque nébuleuse observée le coefficient de rougissement en nous basant à la fois sur les courbes données par A. E. Whitford [32] et L. Divan [33] pour cette absorption et sur les valeurs théoriques du décrément de Balmer calculées par Menzel et Baker [34].

Les valeurs publiées par A. E. Whitford et L. Divan sont raccordées les unes aux autres et données dans le tableau ci-dessous (A en magnitudes) :

1/λ	A	1/λ	A	1/λ	A
0, 0	0, 000	1, 1	1, 280	2, 2	3, 435
0, 1	0, 000	1, 2	1, 484	2, 3	3, 588
0, 2	0, 018	1, 3	1, 687	2, 4	3, 733
0, 3	0, 055	1, 4	1, 891	2, 5	3, 878
0, 4	0, 105	1, 5	2, 095	2, 6	4, 022
0, 5	0, 180	1, 6	2, 299	2, 7	4, 167
0, 6	0, 305	1, 7	2, 503	2, 8	4, 312
0, 7	0, 465	1, 8	2, 706	2, 9	4, 456
0, 8	0, 668	1, 9	2, 910	3, 0	4, 601
0, 9	0, 872	2, 0	3, 110	3, 1	4, 746
1, 0	1, 076	2, 1	3, 280	3, 2	4, 890

Nous allons ici aussi changer de système d'unités et passer des magnitudes aux intensités en admettant un rougissement nul pour Hβ. La courbe de rougissement interstellaire différentiel a alors pour équation : $f(\lambda) = 0,312\ A - 1$; elle est donnée par la figure 17, pour l'intervalle de longueur d'onde utilisé dans ce travail.

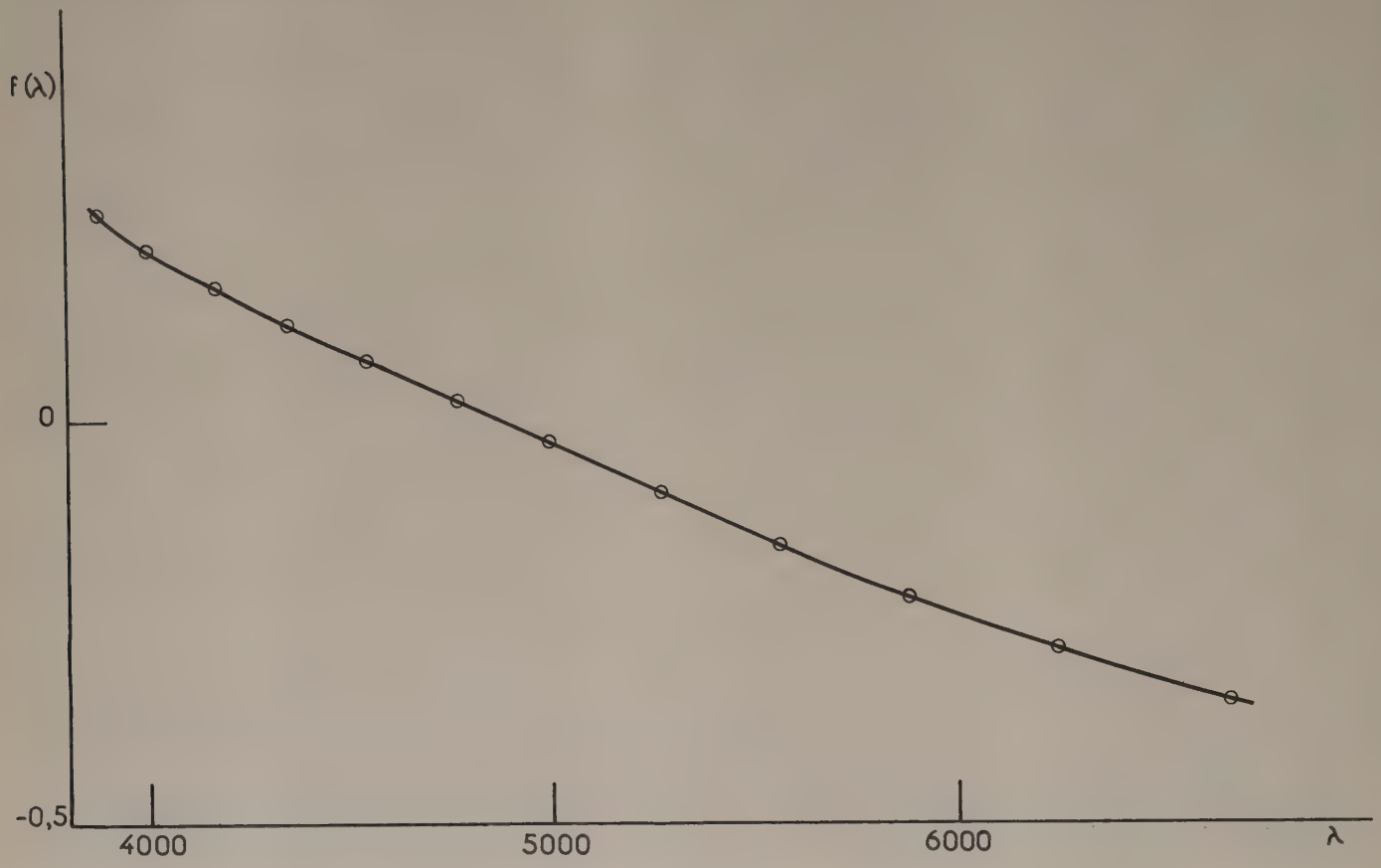


Figure 17 - Rougissement interstellaire différentiel $f(\lambda)$.

On a alors :

$$I_o = I_{h.a} \cdot B^{f(\lambda)} .$$

B est le coefficient de rougissement propre de la nébuleuse. Celui-ci sera déterminé par la comparaison de $I_{h.a}$ avec I_{th} pour les raies de la série de Balmer de l'hydrogène ; nous utiliserons Hα, Hβ, (quand ce sera possible) et Hγ. La théorie de Menzel et Baker - dans le cas B, généralement adopté comme correspondant le mieux avec la réalité - donne pour les intensités théoriques des raies de Balmer les valeurs que nous reproduisons ci-dessous ; elles varient très peu avec la température électronique de la nébuleuse.

	T_e = 10.000°K	T_e = 20.000°K	T_e = 40.000°K	T_e moyenne
Hα	250	259	271	260
Hβ	100	100	100	100
Hγ	51	50	49	50
Hδ	31	30	29	30

Nous adopterons comme système de comparaison les valeurs moyennes.

Considérons les rapports d'intensités :

$$\frac{I\,(6563)}{I\,(4861)} \qquad \text{et} \qquad \frac{I\,(6563)}{I\,(4340)}$$

Il vient :

$$\text{Log}\left[\frac{I\,(6563)}{I\,(4861)}\right]_{th} - \text{Log}\left[\frac{I\,(6563)}{I\,(4861)}\right]_{h.a} = f\,(6563).\ \text{Log}\ B$$

$$\text{Log}\left[\frac{I\,(6563)}{I\,(4340)}\right]_{th} - \text{Log}\left[\frac{I\,(6563)}{I\,(4340)}\right]_{h.a} = [f(6563) - f(4340)]\ \text{Log}\ B$$

puisque $f\,(4861) = 0$. Et si l'on pose : $\log B = c$, on aura :

$$\log\left(\frac{I_{H\alpha}}{I_{H\beta}}\right)_{h.a} - 0,416 = + 0,330\ c$$

$$\log\left(\frac{I_{H\alpha}}{I_{H\gamma}}\right)_{h.a} - 0,716 = + 0,455\ c.$$

d'où c par l'une des deux équations précédentes.

9. Autres données déduites des intensités des raies nébulaires.

Les valeurs de c ainsi obtenues pour chaque nébuleuse permettent de calculer les intensités I_0 qu'auraient les raies nébulaires s'il n'y avait pas de rougissement interstellaire.

a) Nous vérifierons ainsi que les composantes d'un même doublet dans une transition interdite ont des intensités relatives convenables.

L'intensité d'une raie I_{nm} est, en effet, proportionnelle au produit du nombre N_n d'atomes présents sur le niveau supérieur de la transition considérée par la force d'oscillateur correspondante, cette dernière étant elle-même proportionnelle au quantum émis $q = h\nu$ et à la probabilité de transition A_{nm}.

$$I_{nm} = N_n\,.\,h\nu\,.\,A_{nm}.$$

Dans le cas présent, nous avons alors :

$$\frac{I\,(\lambda_1)}{I\,(\lambda_2)} = \frac{A_{\lambda_1}}{A_{\lambda_2}} \times \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$$

Garstrang [35] donne comme valeur de A_λ, pour [O III] :

5007	$2\,p^2\ {}^3P_2 - 2\,p^2\ {}^1D_2$	0,0210
4959	$2\,p^2\ {}^3P_1 - 2\,p^2\ {}^1D_2$	0,0071

et pour [N II] :

6584	$2\,p^2\ {}^3P_2 - 2\,p^2\ {}^1D_2$	0,00300
6548	$2\,p^2\ {}^3P_1 - 2\,p^2\ {}^1D_2$	0,00103

ce qui conduit aux valeurs :

$$\frac{I\,(5007)}{I\,(4959)} = 2,93 \qquad\qquad \frac{I\,(6584)}{I\,(6548)} = 2,95$$

b) Parfois, la valeur du rapport :

$$r\,(O\ III) = \frac{I\,(4959) + I\,(5007)}{I\,(4363)}$$

introduite dans l'équation donnée par Ambartsumian [36] permettra de déterminer la température électronique de la nébuleuse par la relation :

$$r\,(O\ III) = 4,5\ e^{33.000/T_e}\,.$$

c) Nous pourrons également juger de la concordance des valeurs observées avec les valeurs théoriques, notamment pour les raies de l'helium dont Seaton [37] a calculé les valeurs relatives dans l'hypothèse de la recombinaison pure.

He I		He II	
5876	10	4686	50
4471	4,0		
4026	2,1	5411	4,9
		4541	2,6
6678	2,9	4200	1,5
4921	1,2		

Nous ajusterons les intensités de λ 5876 pour He I et de λ 4686 pour He II et nous en déduirons les autres.

Pour certaines nébuleuses, nous donnerons également le rapport d'abondance de l'helium relativement à l'hydrogène d'après Seaton [37]. Pour une température d'environ 15.000°K, on a :

$$\frac{N\,(He\ II)}{N\,(H)} = 0,134\ \frac{I\,(4686)}{I\,(4861)}$$

et

$$\frac{N\,(He\ I)}{N\,(H)} = 1,00\ \ \frac{I\,(5876)}{I\,(4861)}$$

d'où le rapport d'abondance :

$$\frac{N\,(He)}{N\,(H)} = \frac{N\,(He\ II) + N\,(He\ I)}{N\,(H)}$$

en fonction des intensités des raies λ 5876, λ 4686 et Hβ.

Mais il ne faut pas perdre de vue que cette dernière équation n'est valable que dans le cas d'une nébuleuse constituée d'un mélange d'helium et d'hydrogène. Si donc He n'occupe que la partie centrale de l'enveloppe nébulaire, elle ne sera pas utilisable. On pourra juger de cette répartition d'après la hauteur relative des raies de He I et H dans le spectre.

B. RESULTATS D'OBSERVATIONS GLOBALES DE 9 NEBULEUSES PLANETAIRES -

Par cette méthode, il a été possible de déterminer des intensités de raies en émission dans 9 nébuleuses planétaires. Ces valeurs sont assez sûres pour l'intervalle de longueur d'onde : $4200 < \lambda < 6400$. Mais, pour $\lambda < 4200$, les erreurs commises sur les déterminations peuvent être importantes. Ceci est dû au manque de netteté et à la largeur des raies, dont est responsable la courbure de champ de l'optique électronique, difficile à corriger dans cette région éloignée de l'axe. Nous donnerons tout de même des valeurs de I pour $4100 < \lambda < 4200$, mais il ne faut leur accorder que peu de crédit. Au-delà de 6400 A, la dispersion des mesures devient grande ; elle provient d'une toute autre cause : comme on a pu le constater, ρ est alors très petit (souvent plus petit que 0,1) ; il introduit, par conséquent, une incertitude importante sur I ($I = d/\rho$). Mais si le nombre de clichés est assez grand, les valeurs moyennes semblent correctes. Pour les raies surexposées, mais tout de même mesurables, nous avons donné une valeur minimum de l'intensité et l'on trouve par exemple comme valeur de I : > 550, sans limitation supérieure.

A ces nébuleuses, nous en avons adjoint deux autres : NGC 7027 et NGC 7662 pour lesquelles nous ne donnons aucune nouvelle mesure ; elles ont servi de contrôle au procédé de réduction utilisé. A titre de comparaison, en regard des intensités observées sur les clichés de la caméra électronique, nous indiquons les valeurs déterminées par différents auteurs.

1. NGC 7027.

Aller [38], Wyse [39], puis Aller, Bowen et Minkowski [40] ont fait des mesures d'intensité sur les raies nébulaires ; elles sont données respectivement dans les colonnes I_A, I_W, I_{ABM}. n désigne le nombre d'observations pour chaque raie.

Rappelons que $I_{h.a}$ désigne l'intensité hors de l'atmosphère, I_o l'intensité corrigée du rougissement interstellaire et I_{th} les intensités théoriques relatives des raies ; les valeurs de base de I_{th} égalées aux valeurs observées sont soulignées, les unes et les autres.

λ	Id	n	I_A	I_W	I_{ABM}	$I_{h.a}$	I_o	I_{th}
4026	He I	7	1	2	2	4	7	4
4073	[S II]	10	5	7	7	13	22	
4101	H	11	13	14	16	26	44	30
4200	He II	4	0,3	1	2	2	3	2
4267	C II	4	0,4	1	1	2	3	
4340	H	10	27	20	33	35	50	50
4363	[O III]	10	15	10	21	24	34	
4471	He I	11	3	5	4	6	8	8
4541	He II	10	2	2	2	3	4	4
4571	Mg I	9	0,6	1	1	2	2	
4637	N III, C III	10	6	5	7	7	8	
4686	He II	6	39	40	45	48	54	54
4712	[A IV], He I	9		3	4	6	7	
4740	[A IV]	10		7	11	12	13	
4861	H	-	100	100	100	100	100	100
4921	He I	10		3	3	3	3	2,5
5047	He I	4		1	3	2	2	
5200	[N I]	7		3	1	3	2	
5411	He II	9	4	12	9	11	7	5
5518	[Cl III]	3		2	1	4	2	
5538	[Cl III]	5		5	3	3	2	
5755	[N II]	9	10	20	12	24	14	
5876	He I	9	24	25	24	37	20	20
6435	[A V]	3		8	5	22	9	
6548	[N II]	7		90	80	120	45	
6563	H	10	450	420	650	660	258	260
6584	[N II]	9		190	240	280	110	

Le coefficient c de rougissement interstellaire, déterminé à partir du rapport Hα /Hγ est égal à 1,25. Cette valeur est en parfait accord avec celle trouvée par Seaton [37] : 1,22.

Le rapport [N II] I(6584)/I(6548) est trop petit : 2,5 ; ceci est probablement dû au fait que, la dispersion étant faible, la raie 6548 se trouve très près de Hα et que la séparation n'en est pas absolue sur les enregistrements microphotométriques.

Les intensités I_o des raies de He I sont en bon accord avec les intensités théoriques ; celles des raies de He II sont un peu trop fortes. Seaton [37] relève une différence de même sens dans les mesures de Aller, Bowen et Minkowski [40] qu'il explique par des erreurs de mesures. Pour l'abondance relative d'helium dans NGC 7027, Seaton donne 0,194. Nous trouvons ici :

$$\frac{N(He\ II)}{N(H)} = 0,070 \qquad \frac{N(He\ I)}{N(H)} = 0,200, \text{ soit un rapport } \frac{N(He)}{N(H)} = 0,270$$

dans lequel He II intervient dans la proportion de 0,26.

2. NGC 7662.

Aller [38] ; Wyse [39] et Aller et Minkowski [41] donnent les intensités inscrites dans les colonnes I_A, I_W, et I_{AM}.

λ	Id	n	I_A	I_W	I_{AM}	$I_{h.a}$	I_o	I_{th}
4026	He II	4		5	3	3	3	2,8
4073	[S II]	3		2	2	2	2	
4101	H	9	26	25	23	28	30	30
4144	He I	2		1		2	2	
4200	He II	8		3	1,4	2	2	1,9
4267	C II	3		2	1,2	1	1	
4340	H	5	43	40	44	48	50	50
4363	[O III]	7	21	15	19	20	21	
4471	He I	11	3	5	4	4	4	5
4541	He II	11	2	3	2	3	3	3
4637	N III, C III	12	3	4	7	5	5	
4686	He II	5	53	60	51	58	59	59
4712	[A IV] , He I	10	7	15	8	10	10	
4740	[A IV]	10	7	12	8	10	10	
4861	H	3	100	100	100	100	100	100
4921	He I	9		3	1	2,5	2,5	2
5047	He I	2				2	2	
5411	He II	9	4	12	6	7	6	6
5528	[Cl III]	2		3	1,5	2	2	
5876	He I	9	11	15	16	15	14	14
6563	H	8	175	360	390	285	259	260
6678	He I	3		4	6	5,7	5	4

Le coefficient de rougissement interstellaire calculé à partir du rapport Hα /Hγ est trouvé égal à 0,13, valeur assez différente de celle donnée par Seaton [37] : 0,46.

Les intensités observées et corrigées sont en bon accord avec la théorie. De ces mesures, on peut déduire l'abondance d'helium dans la nébuleuse relativement à l'hydrogène : pour He II 0,079, pour He I 0,140, d'où :

$$\frac{N(He)}{N(H)} = 0,219$$

alors que Seaton donne pour cette même grandeur la valeur 0,197. La proportion d'helium ionisé par rapport à l'ensemble est forte : 36 %.

3. IC II 1747.

Le tableau ci-dessous donne les intensités de quelques raies observées dans cette nébuleuse.

λ	Id	n	$I_{h.a}$	I_o	I_{th}
4101	H	7	25	34	30
4340	H	7	40	49	50
4363	[O III]	7	12	15	
4471	He I	7	7	9	10
4541	He II	3	2	2	1
4637	N III, C III	7	6	6	
4686	He II	7	18	19	19
4712	[A IV], He I	6	5	5	
4740	[A IV]	6	4	4	
4861	H	-	100	100	100
4921	He I	5	3	3	3
5411	He II	5	3	2	2
5802	C IV	7	18	13	
5876	He I	7	36	25	25
6548	[N II]	2	36	21	
6563	H	6	450	257	260
6584	[N II]	3	91	52	

Pour cette nébuleuse, le coefficient d'absorption interstellaire est égal à 0,73 d'après la valeur de $H\alpha/H\gamma$. La valeur relative de λ 6548 par rapport à λ 6584 [N II] est ici aussi trop grande ; la raison donnée pour NGC 7027 est certainement valable, comme elle le sera pour toutes les nébuleuses.

L'accord entre I_o et I_{th} est bon pour He I et He II ; on peut en déduire le rapport d'abondance d'helium pour IC II 1747 :

$$\frac{N(He)}{N(H)} = 0,025 + 0,250 = 0,275$$

He II n'en étant responsable que dans la proportion de 9 %.

4. NGC 1514.

Si l'étoile centrale est très brillante, la nébuleuse est au contraire très faible et peu de raies sont mesurables.

La valeur du rougissement interstellaire donnée par le rapport $H\alpha/H\gamma$ est 0,94, celle donnée par $H\alpha/H\beta$ est 1,00. Nous garderons la première valeur 0,94 pour effectuer les réductions de manière à conserver un système homogène.

L'intensité du doublet de [O III] par rapport à Hβ, mesurée par Minkowski [8] est double de celle qui est trouvée ici. Sa détermination ne porte probablement pas sur la même région de la nébuleuse que la nôtre ; nous avons considéré les intensités globales des raies sur une hauteur d'environ 30" de part et d'autre de l'étoile centrale. La valeur observée du rapport I(5007)/I(4959) = 3,05 montre un accord satisfaisant avec la valeur théorique : 2,93. De : r (O III) = 42, on peut déduire une température électronique de 14.800° K pour NGC 1514.

λ	Id	n	$I_{h.a}$	I_o	I_{th}
4340	H	2	40	52	50
4363	[O III]	2	22	28	
4686	He II	2	25	27	
4712	[A IV], He I	2	9	10	
4740	[A IV]	2	12	13	
4861	H	2	100	100	100
4959	[O III]	3	305	290	
5007	[O III]	1	960	890	
6563	H	2	550	267	260

On observe pas He I ; il semble donc que cette nébuleuse soit soumise à une forte excitation et qu'elle soit très pauvre en helium - celui qui existe étant complétement ionisé.

5. NGC 2371-2.

Les intensités des raies mesurables sur nos clichés sont données ci-dessous :

λ	Id	n	$I_{h.a}$	I_o	I_{th}
4101	H	1	29	34	30
4340	H	3	47	52	50
4363	[O III]	2	32	35	
4541	He II	1	8	8	6
4686	He II	3	102	106	106
4712	[A IV], He I	2	21	21	
4740	[A IV]	2	16	16	
4861	H	2	100	100	100
4959	[O III]	2	265	258	
5411	He II	1	12	11	11
5876	He I	1	24	20	
6563	H	1	355	267	260

Le rougissement interstellaire obtenu par comparaison avec les valeurs théoriques du décrément de Balmer est égal à 0,37 par le rapport $H\alpha/H\gamma$ et 0,43 par $H\alpha/H\beta$; nous gardons encore la première valeur pour effectuer les corrections.

Le rapport des raies de [O III] observées conduit à une température électronique de 17.700°K.

Cette nébuleuse est particulièrement riche en He II ; son degré d'excitation doit être très élevé. L'abondance en helium est :

$$\frac{N(He\ II)}{N(H)} = 0,142 \qquad \frac{N(He\ I)}{N(H)} = 0,200$$

d'où :

$$\frac{N(He)}{N(H)} = 0,342$$

avec plus de 40 % d'helium ionisé sur l'ensemble de cet atome.

6. NGC 6058.

Voici les intensités des raies mesurables :

λ	Id	n	$I_{h.a}$	I_o	I_{th}
4340	H	3	41	50	50
4363	[O III]	1	32	39	
4686	He II	4	83	89	
4861	H	5	100	100	100
4959	[O III]	5	360	345	
5007	[O III]	2	1100	1040	
6563	H	2	450	260	260

Pour cette nébuleuse, le coefficient de rougissement dû à l'absorption interstellaire est égal à 0,72. Corrigées, les intensités du doublet de [O III] son dans un rapport satisfaisant : 3,00 en regard de la théorie. De plus, on a : r(O III) = 35,5 qui donne pour la température électronique de cette nébuleuse 16.000° K.

NGC 6058 est encore un objet riche en helium, dont la plus grande partie au moins est ionisée.

7. NGC 6210.

Les intensités des raies qui ont pu être mesurées sont données ci-dessous.

λ	Id	n	$I_{h.a}$	I_o	I_{th}
4026	He I	2	5	7	7
4073	[S II]	3	4	6	
4101	H	4	31	44	30
4144	He I	1	1	2	1
4267	C II	3	2	3	
4340	H	4	39	49	50
4363	[O III]	5	10	13	
4388	He I	1	1,5	2	2
4471	He I	6	10	12	13
4637	N III, C III	6	4	4	
4686	He II	6	5	5	5
4712	[A IV], He I	6	4	4	
4740	[A IV]	6	4	4	
4861	H	-	100	100	100
4921	He I	6	4	4	4
5411	He II	1	1,5	1	0,5
5528	[Cl III]	2	2	1	
5755	[N II]	1	3	2	
5876	He I	5	47	32	32
6563	H	5	473	256	260
6584	[N II]	3	68	37	
6678	He I	3	23	12	10
6724	[S II]	1	14	7	

Le coefficient d'absorption interstellaire apparaît égal à 0,81 par comparaison du rapport Hα/Hγ observé avec sa valeur théorique.

Les raies de l'helium qui sont faibles, en général, ont des valeurs concordant relativement bien avec celles fournies par la théorie, étant donné le petit nombre d'observations de certaines d'entre elles.

De plus, il faut signaler que 4 clichés de cette nébuleuse ont été obtenus alors que les photocathodes utilisées étaient encore planes ; à cause de la courbure de champ de l'optique électronique, ils n'étaient vraiment nets que dans un domaine spectral limité.

Le nombre d'atomes d'helium, relativement au nombre d'atomes d'hydrogène qui forment cet objet, est assez élevé : 0,32 ; une très petite partie en est ionisée.

8. NGC 6804.

Le peu de raies mesurées s'explique par la faible brillance de la nébuleuse.

λ	Id	n	$I_{h.a}$	I_o	I_{th}
4340	H	3	38	50	50
4686	He II	3	82	90	
4861	H	3	100	100	100
4959	[O III]	3	215	205	
5007	[O III]	1	675	625	
6563	H	2	755	264	260

Le rougissement de cette nébuleuse, qu'il soit donné par le rapport Hα/Hγ ou Hα/Hβ, est 0,96.

Le rapport des intensités des composantes du doublet de [O III] est 3,05, valeur correcte.

L'helium apparaît ici encore comme un constituant important de la nébuleuse, dans laquelle il est totalement ionisé.

9. NGC 6853.

Le tableau suivant donne les intensités observées de la partie centrale de la nébuleuse.

λ	Id	n	$I_{h.a}$	I_o	I_{th}
4101	H	5	30	37	30
4340	H	6	48	55	50
4363	[O III]	6	16	18	
4471	He I	1	5	6	7
4541	He II	1	4	4	3
4686	He II	6	54	57	57
4712	[A IV], He I	1	7	7	
4740	[A IV]	1	7	7	
4861	H	5	100	100	100
4921	He I	2	3	3	2
4959	[O III]	3	325	318	
5411	He II	1	7	6	6
5755	[N II]	1	19	15	
5876	He I	3	24	19	19
6548	[N II]	3	159	110	
6563	H	4	408	280	260
6584	[N II]	3	395	273	

Le rougissement interstellaire, déterminé par le rapport Hα /Hγ donne un coefficient c égal à 0,48 ; mais il est peu sûr, car Hα/Hβ conduit à une valeur de c bien plus grande : 0,61.

Le rapport r (O III) correspond à une nébuleuse dont la température électronique est de l'ordre de 12.000° K.

Les intensités des raies de l'helium correspondent assez bien avec les intensités théoriques. On peut en déduire un rapport d'abondance égal à :

$$\frac{N(He)}{N(H)} = 0,076 + 0,190 = 0,266$$

dans lequel He II entre pour 28 %.

10. NGC 6891.

Les clichés pris avec la caméra électronique permettent d'ajouter les intensités de nombreuses raies à celles mesurées par Aller [18].

λ	Id	n	$I_{h.a}$	I_o	I_{th}
4026	He	3	5	5	6
4101	H	5	26	32	30
4267	C II	1	4	5	
4340	H	4	43	50	50
4363	[O III]	3	5	6	
4471	He I	5	8	9	10
4637	N III, C III	4	3	3	
4686	He II	3	3	3	
4712	[A IV], HeI	3	3	3	
4740	[A IV]	3	2	2	
4861	H	-	100	100	100
4921	He I	1	3	3	3
5200	[N I]	1	3	3	
5802	C IV	4	7	6	
5876	He I	5	32	25	25
6563	H	5	380	258	260
6678	He I	3	16	10	7

Le coefficient de rougissement interstellaire est 0,51 et les valeurs comparées de He I révèlent un accord convenable avec la théorie. Seul λ 6678 est trop fort ; mais on a déjà signalé que les déterminations d'intensités dans l'extrême rouge étaient susceptibles d'être entachées d'une erreur importante, à cause de la petite valeur de ρ pour les grandes longueurs d'onde. Les atomes de He, qui existent presque exclusivement à l'état neutre, sont 4 fois plus rares que ceux de H.

11. IC 1470.

Cette nébuleuse ne semble pas avoir été observée ; voici les intensités des raies mesurables sur nos clichés.

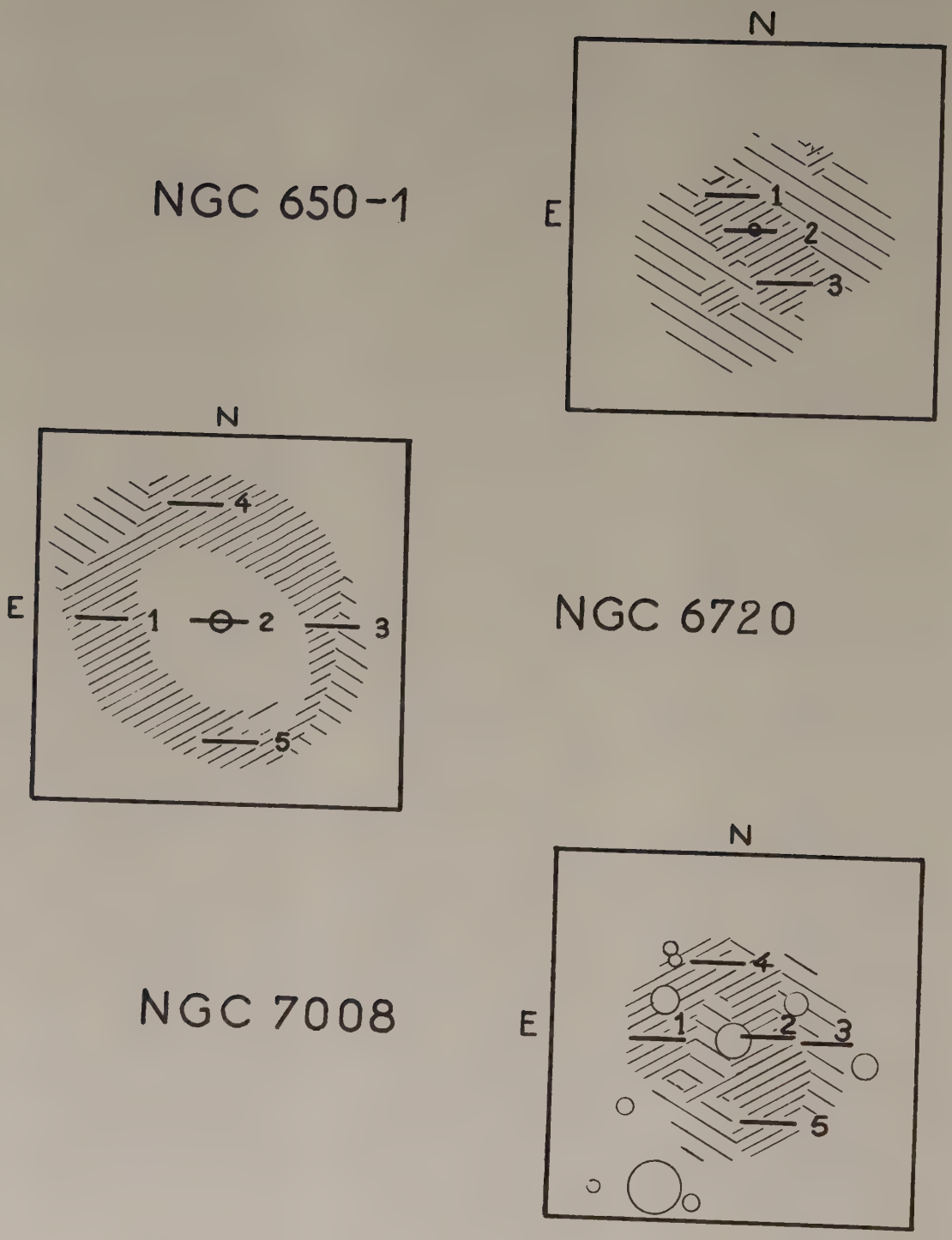


Figure 18 -

λ	Id	n	$I_{h.a}$	I_o	I_{th}
4101	H	4	19	34	30
4340	H	7	34	51	50
4471	He I	1	7	9	8,5
4861	H	2	100	100	100
4921	He I	3	3	3	2,5
4959	[O III]	2	70	70	
5876	He I	6	40	21	21
6563	H	6	745	261	260
6584	[N II]	1	175	60	

IC 1470 est une nébuleuse très rougie par l'absorption interstellaire ; le coefficient c est égal à 1,40.

C'est la seule nébuleuse planétaire parmi celles que nous avons mesurées pour laquelle λ 4959 [O III] est moins intense que Hβ ; de ce fait, λ 4363 est tout à fait absent. C'est également la seule qui ne montre pas He II ; elle doit donc être soumise à une très faible excitation. Son enveloppe contient environ 5 fois moins d'helium que d'hydrogène.

C. RESULTATS D'OBSERVATIONS DETAILLEES DE 3 NEBULEUSES PLANETAIRES -

Si l'on excepte NGC 1514 et NGC 6853, les nébuleuses dont nous avons fait l'étude globale sont peu étendues et les spectres que nous avons obtenus ne permettent pas d'en étudier différentes régions bien déterminées. Le spectre de NGC 6853 montre des raies uniformes sur toute la hauteur de la fente ; NGC 1514 présente des variations d'intensité dans la partie considérée (environ 1' autour de l'étoile centrale), mais elle est faible et son étoile centrale trop brillante gêne les observations précises.

Dans trois grandes nébuleuses : NGC 650-1, NGC 6720 et NGC 7008, nous avons pu distinguer des régions différentes ; un dessin montre les régions étudiées dans ces objets.

1. NGC 650-1.

La figure ci-dessus identifie les régions 1, 2 et 3.

		Région 1			Région 2			Région 3			
λ	Id	n	$I_{h.a}$	I_o	n	$I_{h.a}$	I_o	n	$I_{h.a}$	I_o	I_{th}
4072	[S II]							2	9	12	
4101	H	2	25	32	2	27	34	4	27	34	30
4340	H	3	41	48	3	43	51	5	45	53	50
4363	[O III]	3	19	22	3	17	20	5	19	22	
4471	He I	2	5	6	2	6	7	3	4	5	6
4541	He II	2	4	4	1	4	4	3	4	4	3,5
4686	He II	2	61	65	3	63	67	5	63	67	66
4712	[A IV], He I	2	3	3	1	4	4	4	6	6	
4740	[A IV]	2	4	4	1	4	4	4	4	4	
4861	H	2	100	100	2	100	100	3	100	100	100
4921	He I							1	3	3	2

		Région 1			Région 2			Région 3			
λ	Id	n	$I_{h.a}$	I_o	n	$I_{h.a}$	I_o	n	$I_{h.a}$	I_o	I_{th}
4959	[O III]	1	280	270				1	280	270	
5200	[N I]	1	5	5	1	5	5	4	6	5	
5411	He II	1	6	5	2	6	5	3	6	5	6
5518	[Cl III]				1	4	3				
5538	[Cl III]				1	5	4				
5755	[N II]	2	13	10	2	15	12	4	14	11	
5876	He I	2	19	14	2	20	15	3	19	14	14
6548	[N II]	2	150	97	2	120	78	4	178	114	
6563	H	3	430	279	2	360	235	5	413	269	260
6584	[N II]	2	474	308	3	387	250	4	500	328	

Les rapports $H\alpha/H\gamma$ et $H\alpha/H\beta$ donnent pour c respectivement 0,57 et 0,59 pour la moyenne des déterminations.

Sur les intensités corrigées de ce coefficient, nous constatons que la seule différence certaine entre les diverses régions considérées est que le doublet de [N II] est plus faible dans la partie centrale que dans les régions 1 et 3. Ceci traduit une densité électronique plus forte au centre de la nébuleuse que vers les extrémités.

Les intensités des raies de He I et He II correspondent normalement avec les valeurs théoriques. Les mesures faites permettent de déduire le rapport d'abondance He/H de cette nébuleuse. En effet :

$$\frac{N(He\ II)}{N(H)} = 0,089 \qquad \frac{N(He\ I)}{N(H)} = 0,140$$

d'où :

$$\frac{N(He)}{N(H)} = 0,229.$$

La proportion d'atomes ionisés d'helium sur la quantité totale de ce corps est d'environ 40 %.

2. NGC 6720.

Dans la nébuleuse de la Lyre, nous avons distingué 5 régions numérotées : 1 pour l'est de l'anneau, 2 pour le centre, 3 pour l'ouest de l'anneau, 4 et 5 respectivement pour les parties nord et sud de cette enveloppe. Les résultats des mesures sont donnés dans le tableau suivant :

		Région 1			Région 2			Région 3			Région 4			Région 5			
λ	Id	n	$I_{h.a}$	I_o	n	$I_{h.a}$	I_o	n	$I_{h.a}$	I_o	n	$I_{h.a}$	I_o	n	$I_{h.a}$	I_o	I_{th}
4101	H	10	24	30	9	27	34	10	25	31	1	25	31	2	26	33	30
4340	H	11	43	50	11	43	50	11	43	50	1	43	50	2	43	50	50
4363	[O III]	10	10	12	11	14	16	10	11	13	1	9	10	2	9	10	
4471	He I	11	6	7	2	7	8	7	7	8	1	3	4	1	5	6	7
4541	He II	3	2,5	2,5	1	5	5	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1-3
4571	Mg I	1	3	3				1	3	3	1	2	2	1	3	3	
4637	NIII, C III	3	3	3	3	8	8	2	4	4	1	1	1	1	3	3	
4686	He II	11	16	17	11	55	58	11	22	23	1	29	30	2	21	22	20-58
4712	[A IV], He I	2	3	3	7	9	9	1	2	2	1	3	3	1	4	4	
4740	[A IV]	2	3	3	6	10	10	1	2	2	1	2	2	1	2	2	
4861	H	6	100	100	9	100	100	7	100	100	1	100	100	1	100	100	100
4921	He I	6	3	3	6	4	4	6	3	3	1	2,5	2				2
4959	[O III]	2	>255	>250	4	>255	>250	2	>180	>175				1	>180	>175	
5200	[N I]	8	9	8	1	7	6	4	9	8	1	4	4	1	8	7	
5411	He II	1	3	3				1	3	3	1	5	4				2-6
5755	[N II]	4	13	10				3	12	9	1	8	6	1	14	11	
5876	He I	6	24	18	2	21	16	5	22	17	1	20	15	1	23	18	17
6548	[N II]	5	225	151				7	133	89	1	134	90	1	190	127	
6563	H	5	380	255	5	375	251	7	415	278	1	391	262	1	394	264	260
6584	[N II]	5	493	330	1	100	67	7	350	235	1	303	203	1	460	310	
6724	[S II]	1	55	35				1	59	38							

Le coefficient d'absorption interstellaire donné par la moyenne des valeurs de Hα/Hγ est 0,54 ; Hα/Hβ donne un nombre presque identique. Nous corrigerons donc nos mesures à l'aide de ce facteur.

Le rapport moyen [N II] 6584/6548 est ici encore trop faible : 2,40.

Les intensités relatives moyennes des raies de He I sont, en général, en accord satisfaisant avec les intensités théoriques. Par contre, celles de He II sont systèmatiquement trop fortes. L'abondance en helium neutre est, en moyenne :

$$\frac{N(\text{He I})}{N(\text{H})} = 0,17 \ ;$$

celle en helium ionisé varie avec la région considérée de la nébuleuse entre : 0,023 et 0,078 ; c'est-à-dire que la proportion de He II dans la quantité totale d'helium diminue de 0,31 à 0,12 en allant du centre vers l'anneau. Dans NGC 6720, on trouve donc 4 à 5 fois plus d'hydrogène que d'helium.

Si l'on se déplace à nouveau du centre vers l'extérieur, on constate un renforcement très important des raies de [N II] jusqu'à être plus intenses que Hα à l'extrême bord de la nébuleuse. Le rapport des raies de [N II] (6548 + 6584)/5755 est plus grand (~ 50) au nord et à l'est que dans les régions sud et ouest (~ 40), ce qui indique une densité électronique plus grande dans la partie S-O. Nous n'avons pas pu faire de mesures au voisinage de l'étoile centrale à cause de la faiblesse des raies.

Les raies de [O I] se rencontrent dans les mêmes régions que celles de [N II], mais elles sont beaucoup plus faibles : environ 0,5 $I_{H\beta}$ pour 6300.

La répartition de l'intensité varie selon les raies avec la distance à l'étoile centrale ; il est intéressant de voir comment. Les figures 19 à 25 montrent les variations de H 6563 et 4861, [O III] 5007 et 4959, [N II] 6584 et 6548 et He II 4686 selon un diamètre Est-Ouest. Les intensités des raies sont si différentes les unes des autres qu'il a été impossible de se placer toujours dans les mêmes conditions pour les enregistrements au microphotomètre ; elles ne sont donc pas comparables entre elles. Chaque graphique représente seulement la variation relative le long de la raie.

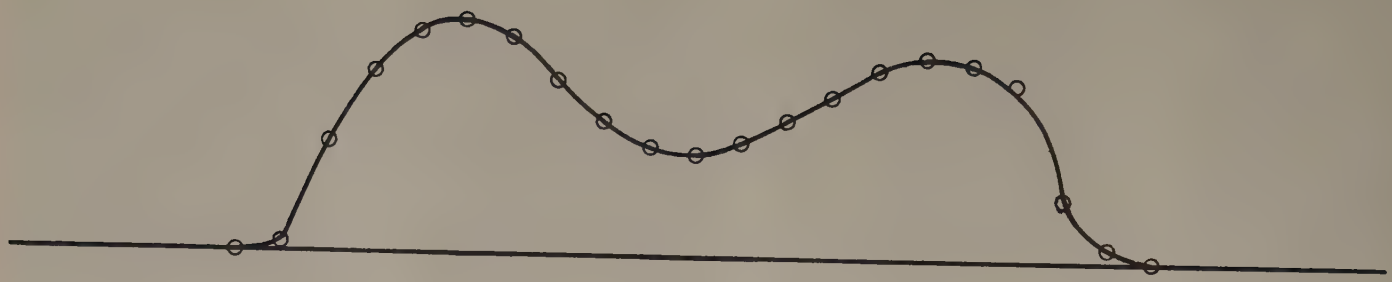


Figure 19 - λ 6563 Hα.

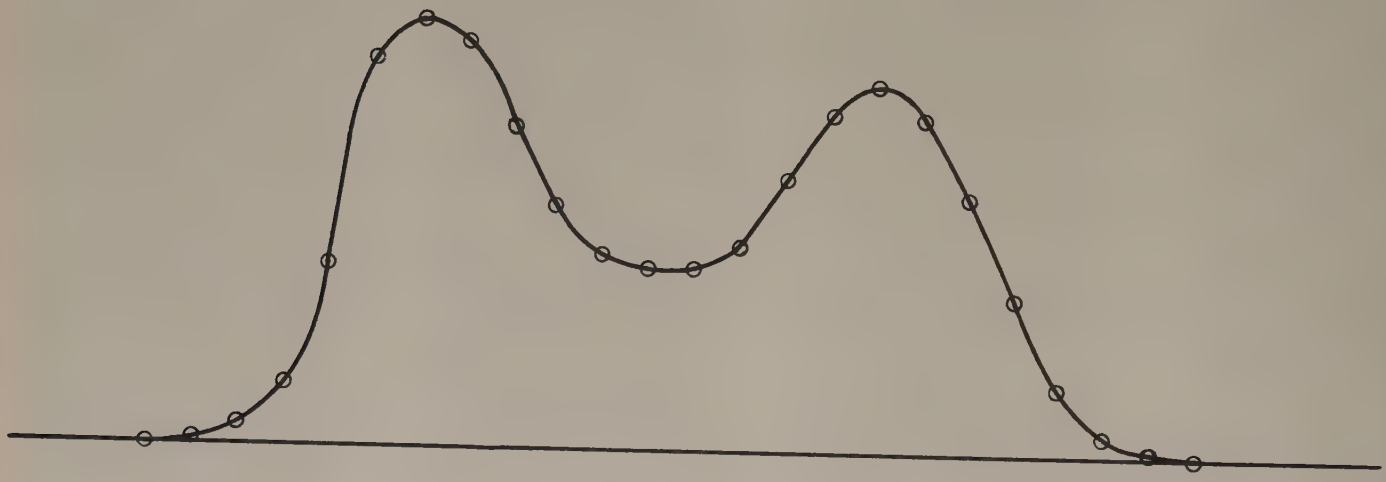


Figure 20 - λ 4861 Hβ.

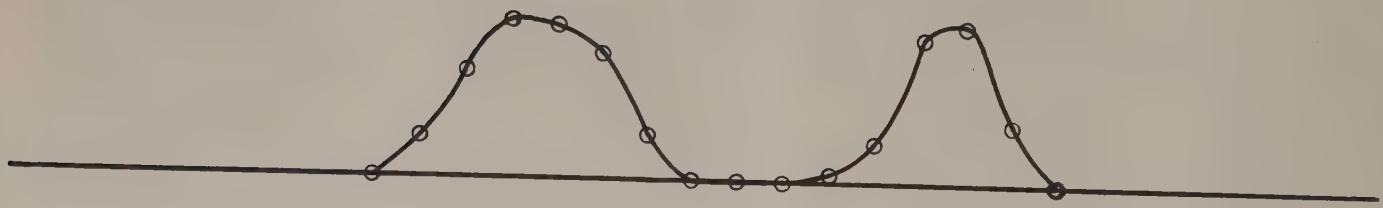


Figure 24 - λ 6548 [N II].

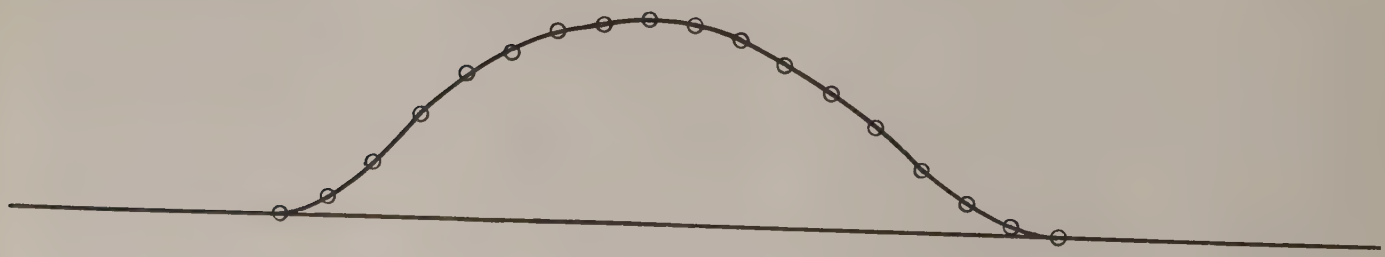


Figure 25 - λ 4686 He II.

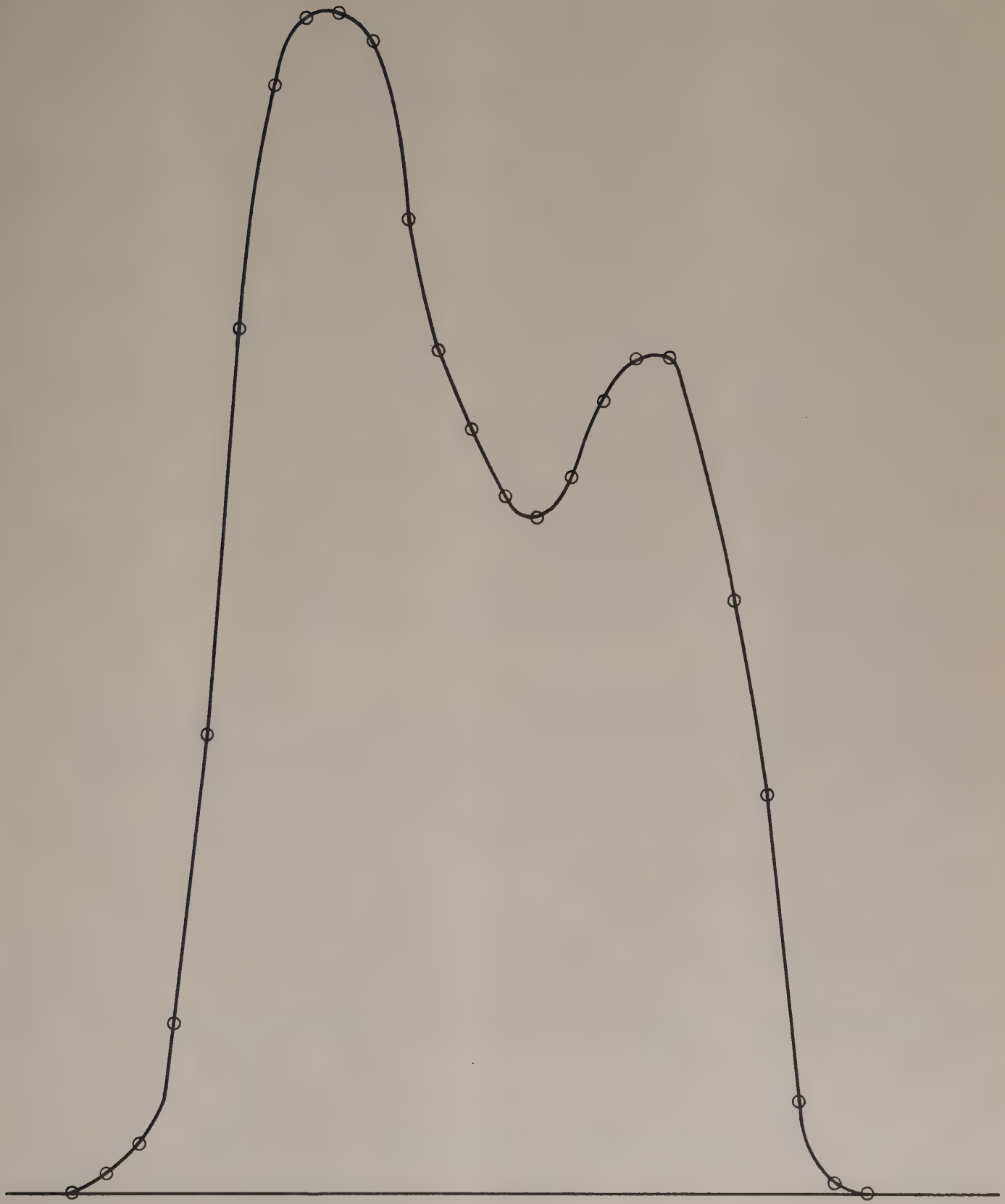


Figure 21 - λ 5007 [O III].

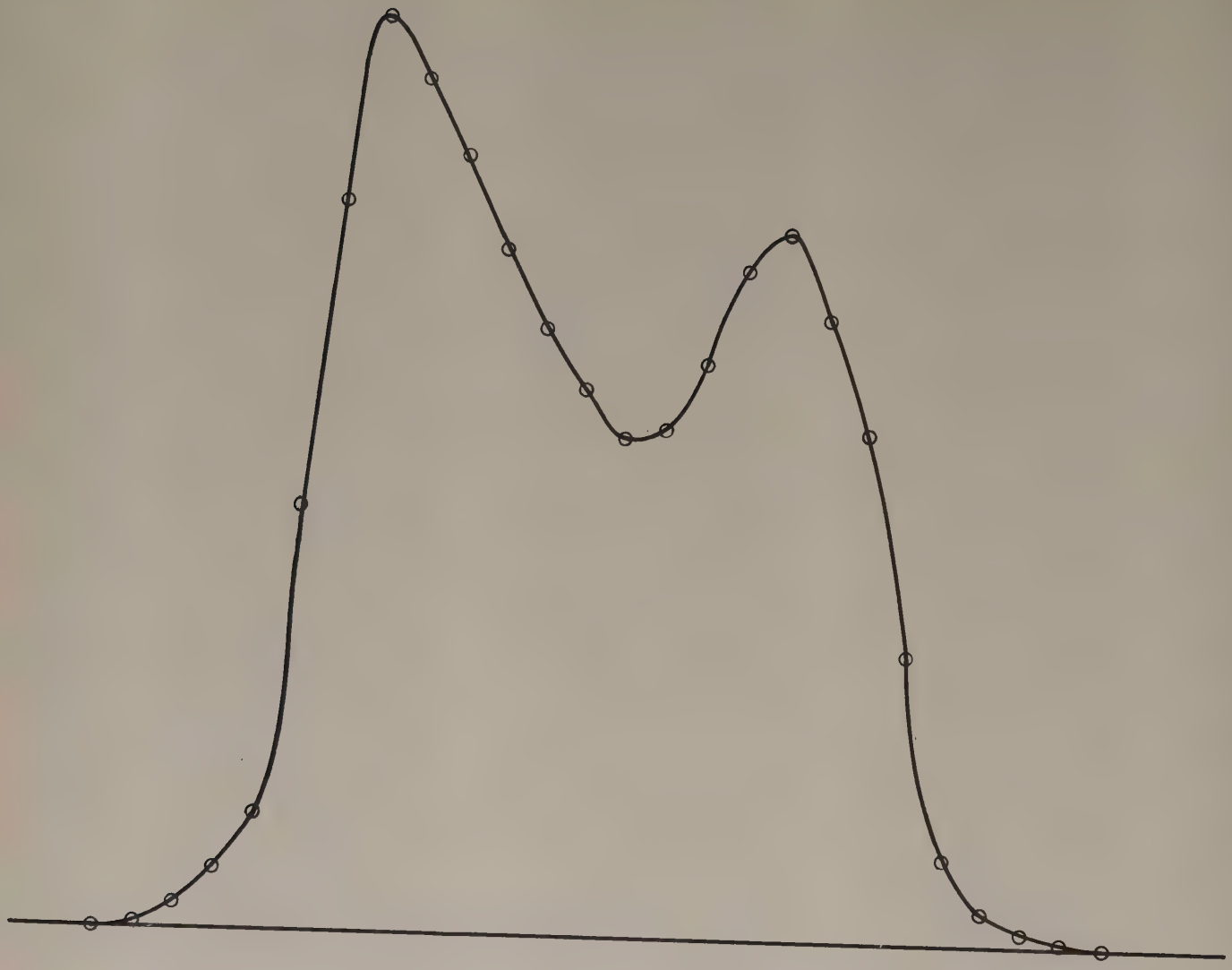


Figure 22 - λ 4959 [O III].

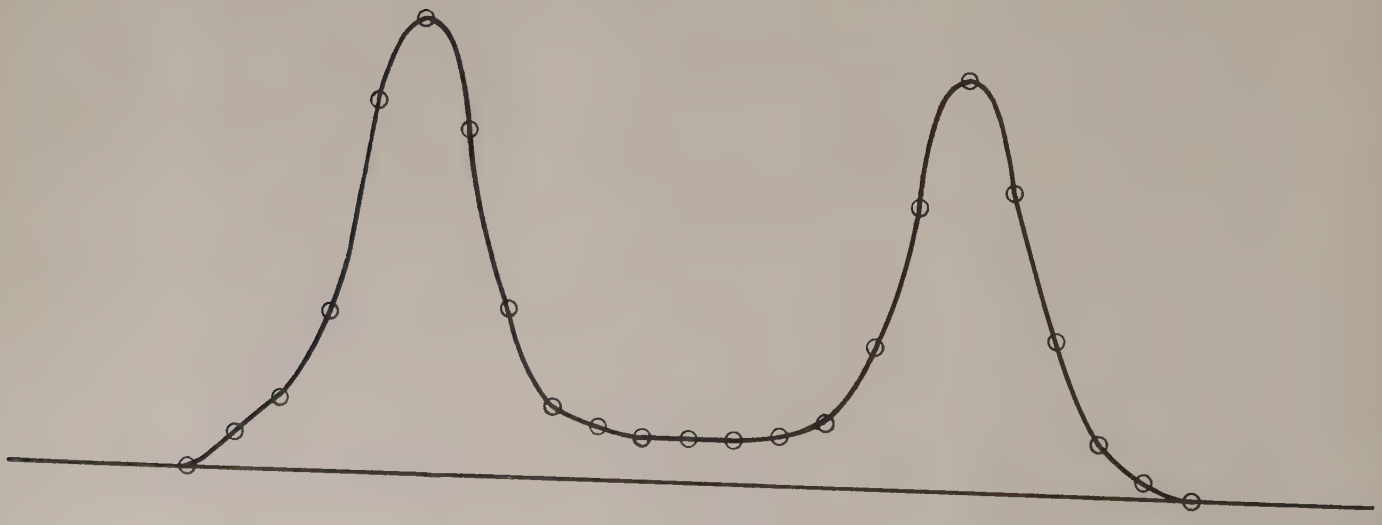


Figure 23 - λ 6584 [N II].

Ces figures mettent en évidence la stratification de l'enveloppe nébulaire, extrèmement visible dans NGC 6720.

3. NGC 7008.

Dans cette grande nébuleuse, nous avons pu étudier 5 régions différentes désignées par : 1 pour l'est, 2 pour la partie centrale, 3 pour l'ouest, 4 et 5 pour le nord et le sud (voir figure 18).

		Région 1			Région 2			Région 3			Région 4			Région 5			
λ	Id	n	$I_{h.a}$	I_o	n	$I_{h.a}$	I_o	n	$I_{h.a}$	I_o	n	$I_{h.a}$	I_o	n	$I_{h.a}$	I_o	I_{th}
4101	H	5	29	47	5	30	48	5	27	44	2	22	36				30
4340	H	5	36	50	6	37	51	5	36	50	2	35	48	1	36	50	50
4363	[O III]				5	16	22	3	13	18	2	16	22	1	22	30	
4471	He I				1	10	12				1	8	10				7
4541	He II				2	7	9	2	9	11	1	8	10				7
4637	N III, C III	2	9	10	4	10	11	2	7	8							
4686	He II	6	115	128	6	122	135	6	111	123	1	80	89	1	88	98	129-90
4712	[A IV], He I	2	12	13	5	16	17	3	15	16	2	10	11	1	15	16	
4740	[A IV]	2	11	12	5	13	14	5	11	12	2	8	9				
4861	H	5	100	100	6	100	100	5	100	100	2	100	100				100
4959	[O III]	3	215	202	5	200	188	4	175	165							
5007	[O III]	2	625	575	4	620	570	3	500	460							
5411	He II	2	24	17	6	26	19	3	23	17				1	12	9	13
5876	He I	3	28	16	3	30	17	4	32	18	4	27	15				17
6563	H	4	600	258	3	603	259	3	646	278	2	592	255	1	605	260	260

Le rougissement interstellaire moyen est 1,13 tant par $H\alpha/H\gamma$ que par $H\alpha/H\beta$. Le rapport des raies de [O III] 5007/4959 est en moyenne égal à 2,89, donc en très bon accord avec la théorie. La valeur de r(O III) est 34 ce qui donne pour NGC 7008 une température électronique : T = 16.700°K. Par contre, relativement à λ 5876, λ 4471 He I est fort là où il a pu être mesuré ; de même, λ 4541 et λ 5411 de He II par rapport à λ 4686. Il faut toutefois signaler que ces raies sont très faibles sur les clichés ; des mesures plus précises nécessiteraient des temps de pose plus longs.

Le rapport d'abondance de l'helium sera, de ce fait, assez peu sûr.

$$\frac{N(He)}{N(H)} = 0,17 + 0,17 = 0,34.$$

Malgré tout, il est intéressant parce qu'exceptionnellement grand : He II participe à cette abondance pour 50 %.

Cette nébuleuse ne montre pas de différences très marquées suivant les régions considérées ; notons pourtant que He II est plus faible dans les zones 4 et 5 qui sont les plus éloignées de l'étoile centrale ; ceci est tout à fait normal.

D. RESUME DES RESULTATS OBTENUS PAR SPECTROPHOTOMETRIE -

1. Erreurs.

La comparaison des mesures faites sur des clichés différents conduit à signaler deux points importants :

a) Mesures des raies faibles.

Ces mesures sont évidemment moins précises en valeur absolue que celles qui portent sur des raies normalement exposées ; ceci pour plusieurs raisons. Tout d'abord, un défaut d'homogénéité de la couche sensible de la photocathode pourra perturber gravement l'intensité du fond de la plaque, jusqu'à produire un véritable trou d'intensité. De plus, les plaques sensibles aux électrons que nous utilisons sont très délicates à manier du fait de leurs petites dimensions, de leur facilité à se rayer et de leur sensibilité à la pression. Enfin, si nous pouvons actuellement maintenir dans le tube un très bon vide grâce au fonctionnement de la pompe à titane pendant toute la manipulation, il n'en a pas toujours été ainsi et bien des premiers clichés utilisés présentent une légère tache ionique. Tous ces défauts apparaissant finalement sur la plaque rendent souvent difficile une bonne détermination du fond de plaque sur l'enregistrement. Or, il est évident que cette erreur absolue produit sur une mesure de raie une erreur relative d'autant plus importante que la raie est plus faible. De plus, l'erreur faite en effectuant la mesure agit dans le même sens.

On a donc tendance à faire sur l'intensité d'une raie faible une mesure entachée d'erreur systèmatique, dans le sens de la surestimation. Ceci suffit peut-être à expliquer les écarts entre l'observation et la théorie que nous avons parfois remarqués sur les raies faibles de l'helium.

b) Précision des mesures d'intensité.

Pour la majorité des raies normalement exposées, nous pouvons évaluer l'erreur relative sur la valeur donnée pour l'intensité à 10 %, quand on possède un nombre de clichés suffisant pour éliminer les erreurs accidentelles dûes aux défauts des plaques ou des photocathodes. Ceci est valable dès que l'on dispose de 2 ou 3 clichés pris au cours d'expériences différentes. Signalons d'ailleurs que les mesures aberrantes dûes à ces défauts sont faciles à éliminer, si l'on peut avoir sous les yeux un agrandissement sur papier du cliché étudié où ils apparaissent d'une façon plus évidente : la seule solution est, bien sûr, d'éliminer la mesure en question.

Etant donné la faible dispersion des spectres obtenus avec la caméra électronique (380 A/mm) et la faible luminosité des objets étudiés, cette erreur nous paraît tout à fait acceptable. Nous allons dans les paragraphes suivants grouper quelques-uns des résultats obtenus.

2. Températures électroniques.

Il est intéressant de grouper les températures électroniques que nous avons déterminées au cours de ce travail.

Nébuleuse	T_e
NGC 1514	14.800° K
NGC 2371-2	17.700° K
NGC 6058	16.000° K
NGC 6853	12.000° K
NGC 7008	16.700° K

Pour NGC 650-1, nous pouvons seulement donner $T_e < 13.500°$ K. Les températures de ces nébuleuses n'ayant pas encore été déterminées, nous n'avons pas de point de comparaison ; toutefois, l'ordre de grandeur paraît correct.

3. Abondances relatives d'helium.

Le nombre d'atomes d'helium par rapport au nombre d'atomes d'hydrogène qui forment les nébuleuses est donné pour chacune d'elles dans le tableau qui suit ; nous y indiquons également la proportion d'atomes ionisés par rapport à la totalité des atomes d'helium et l'abondance d'helium ionisé relativement à l'hydrogène.

Nébuleuse	He/H	He II/He	He II/H	Nébuleuse	He/H	He II/He	He II/H
NGC 650-1	0,23	0,39	0,090	NGC 6804	0,12	1,00	0,120
IC II 1747	0,28	0,09	0,025	NGC 6853	0,27	0,28	0,075
NGC 1514	0,04	1,00	0,040	NGC 6891	0,25	trace	-
NGC 2371-2	0,34	0,42	0,143	NGC 7008	0,34	0,50	0,170
NGC 6058	0,12	1,00	0,120	NGC 7027	0,27	0,26	0,070
NGC 6210	0,32	trace	-	IC 1470	0,21	-	-
NGC 6720	0,17	0,31	0,053	NGC 7662	0,22	0,36	0,080

Eliminons de ce tableau la nébuleuse IC 1470, classée précédemment dans le groupe I, qui ne montre aucune trace de He II et séparons celles du groupe II de celles du groupe III, en portant en regard de chacune d'elles la différence :

$$\Delta m = m_{\bigstar} - m_{néb}$$

calculée d'après les données du catalogue de Becvar reproduites dans le chapitre I. Nous obtenons le tableau qui suit :

Nébuleuse	Δm	He II/H	
IC II 1747	1,4	0,025	Groupe II
NGC 1514	-1,1	0,040	
NGC 6210	2,8	trace	
NGC 6891	0,2	trace	
NGC 650-1	4,4	0,090	Groupe III
NGC 2371-2	0,3	0,143	
NGC 6058	1,1	0,120	
NGC 6720	5,4	0,053	
NGC 6804	0	0,120	
NGC 6853	5,8	0,075	
NGC 7008	-0,4	0,170	
NGC 7027	6,7	0,070	
NGC 7662	3,6	0,080	

Un graphique donne He II/H = f(Δ m). Nous avons également porté sur cette figure les valeurs de I(4686)/I(4861) ramenées au même système pour d'autres nébuleuses mesurées par Minkowski [41] et Aller [18] ; ces valeurs ont été corrigées du rougissement interstellaire obtenu en comparant le rapport Hβ/Hγ observé à sa valeur théorique.

Les nébuleuses à faible excitation se placent évidemment toutes en bas et à gauche du graphique. Mais celui-ci montre, pour les nébuleuses à forte excitation, qu'il existe une relation nette entre le rapport d'abondance He II/H et la différence de magnitude du noyau et de la nébuleuse ; He II/H décroit quand Δm croit.

La partie gauche de la bande correspond à des nébuleuses dont l'épaisseur optique τ_H est amoindrie pour l'absorption de H ; celle de droite, au contraire, à des nébuleuses de grande épaisseur optique pour l'hydrogène. Autrement dit, quand l'épaisseur optique τ_H de H diminue, π = I(4686)/I(4861) croît ; ou bien quand l'épaisseur optique $\tau_{He\ II}$ de l'helium ionisé diminue, π décroît. Cette relation est assez nette, étant donné le peu de précision des évaluations de magnitudes.

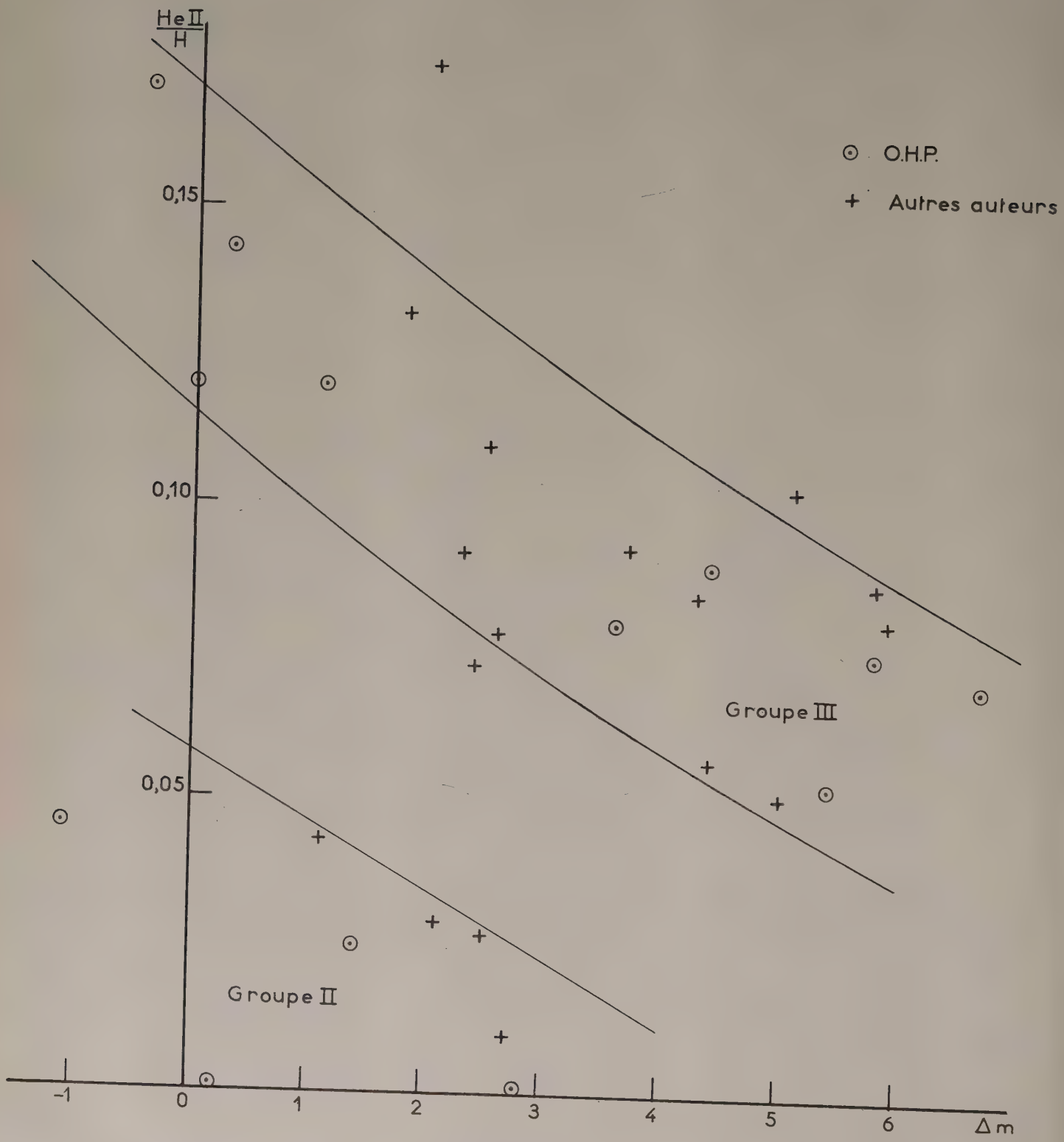

HeII
H
0,15
0,10
0,05
O.H.P.
Autres auteurs
Groupe III
Groupe II
-1
0
1
2
3
4
5
6
Δm

Figure 26 -

4. Températures des noyaux.

a) Zanstra [42] montre qu'il existe une relation entre la température du noyau de la nébuleuse et la grandeur de Δm. Utilisant ce procédé voici quelles sont les températures obtenues pour les étoiles centrales des objets considérés.

NGC	Δ m	T★	NGC	Δ m	T★
650-1	4,4	52.000	6804	0	25.000
II 1747	1,4	31.000	6853	5,8	70.000
1514	-1,1	-	6891	0,2	26.000
2371-2	0,3	26.000	7008	-0,4	-
6058	1,1	30.000	7027	6,7	87.000
6210	2,8	39.000	7662	3,6	45.000
6720	5,4	65.000			

Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles données par diverses méthodes de différents auteurs ; elles semblent tout à fait plausibles. Nous les avons déterminées surtout pour servir de comparaison à celles que l'on obtient par la méthode suivante.

b) Ambartsumian [43] propose une méthode pour évaluer aussi la température des étoiles centrales.

Le nombre de quanta ultra-violet émis par l'étoile au-dessous de la limite de la série de Lyman est égal au nombre N de recombinaisons qui ont lieu pour l'ensemble de la nébuleuse, si celle-ci est optiquement épaisse pour H ; si elle l'est également pour He II, on aura :

$$\pi = \frac{I(4686)}{I(4861)} = \frac{A_{43}}{A_{42}} \times \frac{N'}{N} \times \frac{h\nu'}{h\nu}$$

A_{43} et A_{42} sont les probabilités de transition ; elles sont égales à $8,37.10^6$ et $8,94.10^6$ [44]. D'où :

$$\frac{N'}{N} = \frac{A_{42}}{A_{43}} \times \frac{4686}{4861} \times \pi = 0,904\,\pi$$

Ambartsumian donne une table qui fournit la température T de l'étoile centrale en fonction du rapport π.

NGC	π	T★	NGC	π	T★
650-1	0,66	210.000	6804	0,90	237.000
II 1747	0,19	170.000	6853	0,57	200.000
1514	0,27	151.000	6891	0,03	87.000
2371-2	1,06	255.000	7008	1,30	280.000
6058	0,89	236.000	7027	0,54	181.000
6210	0,05	97.000	7662	0,59	204.000
6720	0,58	201.000			

Les grandeurs auxquelles conduit l'application de cette méthode semblent exceptionnellement élevées et ne peuvent constituer qu'une limite supérieure des températures des noyaux. Ceci est logique, puisque nous avons supposé que les nébuleuses étaient à la fois optiquement épaisses pour H et He II, ce qui n'est certainement pas le cas général. Il faudrait faire intervenir un coefficient liant le nombre de quanta U-V émis par l'étoile au nombre de recombinaisons se produisant dans la nébuleuse. Certains auteurs ont choisi arbitrairement la valeur 0,5 pour ce coefficient ; nous préférons continuer de regarder les températures données par la méthode d'Ambartsumian comme une extrême limite supérieure.

Zanstra a donné plusieurs autres méthodes de détermination de cette grandeur ; elles reposent sur la mesure du continuum de l'étoile centrale correspondant aux raies nébulaires et donnent certainement des évaluations plus correctes des températures. Malheureusement, ces procédés sont inapplicables à la plupart des clichés considérés dans ce travail, car ceux-ci, comme nous l'avons déjà signalé, ont été obtenus avant l'installation d'une pompe à titane sur le tube et présentent de ce fait très souvent une tache ionique se superposant au spectre continu du noyau et le perturbant de façon non négligeable.

c) Si nous considérons les spectres des noyaux des nébuleuses à forte excitation observées à la caméra électronique, il faut constater que six d'entre eux sont continus et que celui de NGC 650-1 n'a pas pu être photographié. Pour NGC 7662, Aller [16] trouve un spectre continu, tandis que Swings [7] suggère pour cette étoile la classe WN. Le noyau de NGC 7027 n'a pas été observé. Il semble pourtant qu'il faille se garder de généraliser et de conclure à l'existence de spectres continus pour les noyaux de nébuleuses planétaires à haute excitation. Nous préférons conserver l'hypothèse que les spectres des noyaux apparaîtront bien moins souvent comme continus, au fur et à mesure de l'accroissement des possibilités d'observations.

5. Absorption interstellaire.

Terminons en récapitulant les valeurs trouvées pour le coefficient de rougissement interstellaire.

NGC 650-1	0,57	NGC 6210	0,81	NGC 7008	1,13
IC II 1747	0,73	NGC 6720	0,54	NGC 7027	1,25
NGC 1514	0,94	NGC 6804	0,96	IC 1470	1,40
NGC 2371-2	0,37	NGC 6879	0,48	NGC 7662	0,13
NGC 6058	0,72	NGC 6891	0,51		

On ne peut rien en déduire pour les distances de nébuleuses, car l'absorption interstellaire ne peut, sans risque d'erreur grossière, être supposée uniforme dans des régions aussi différentes que celles qui contiennent les objets étudiés. Remarquons pourtant que les grandes valeurs du rougissement correspondent, généralement, à des nébuleuses situées près du plan galactique.

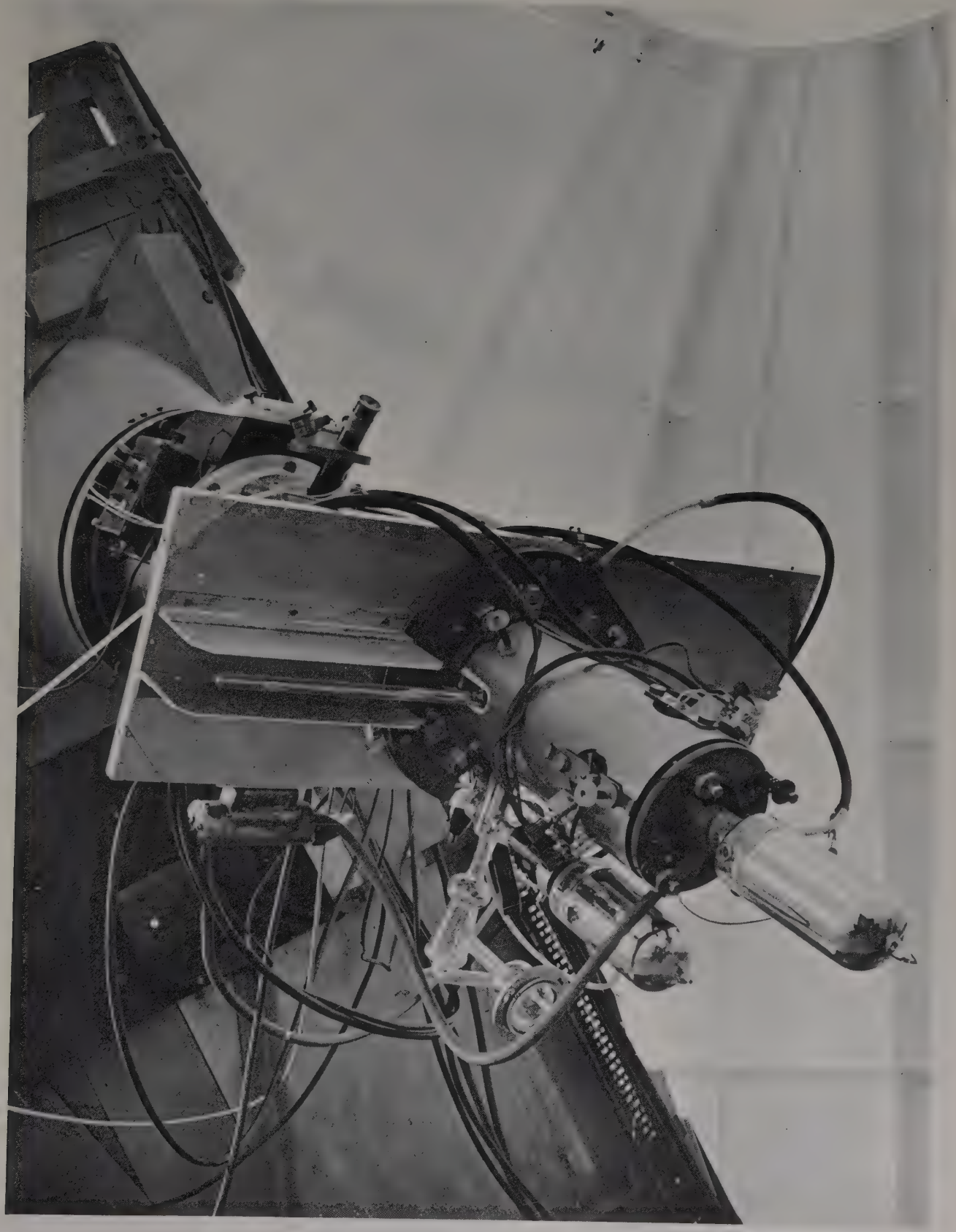
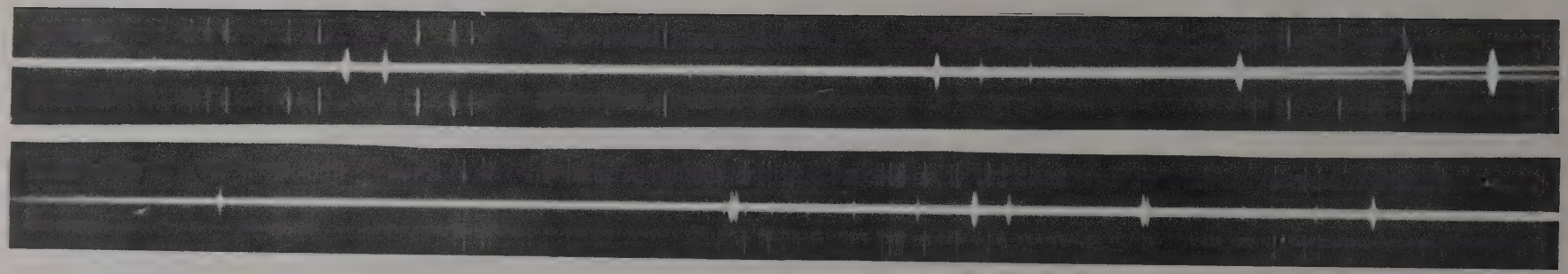
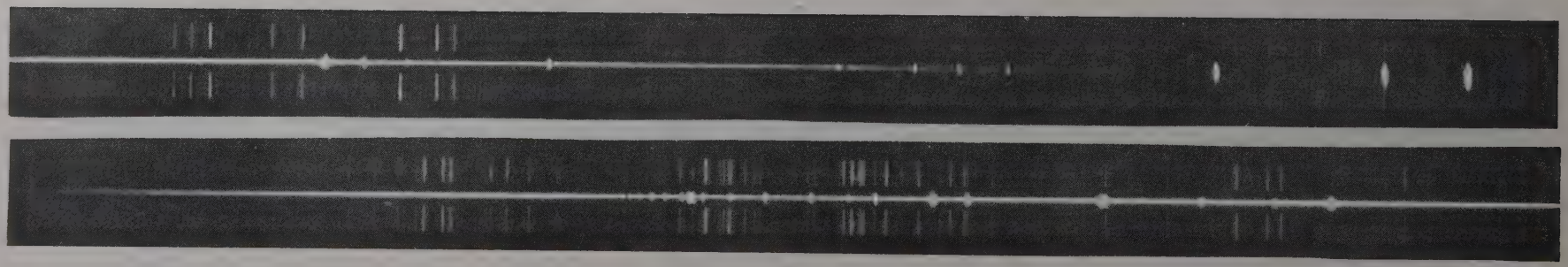


Planche I - La caméra électronique sur le télescope de 120 cm.

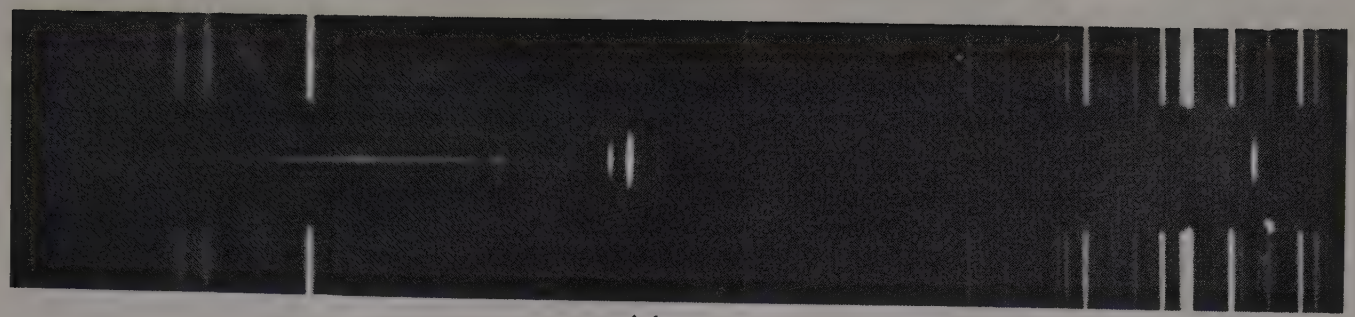


(a)

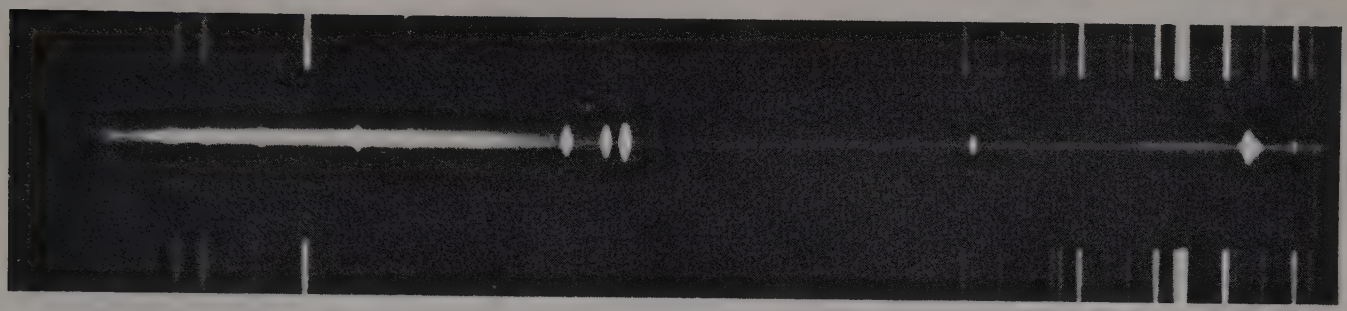


(b)

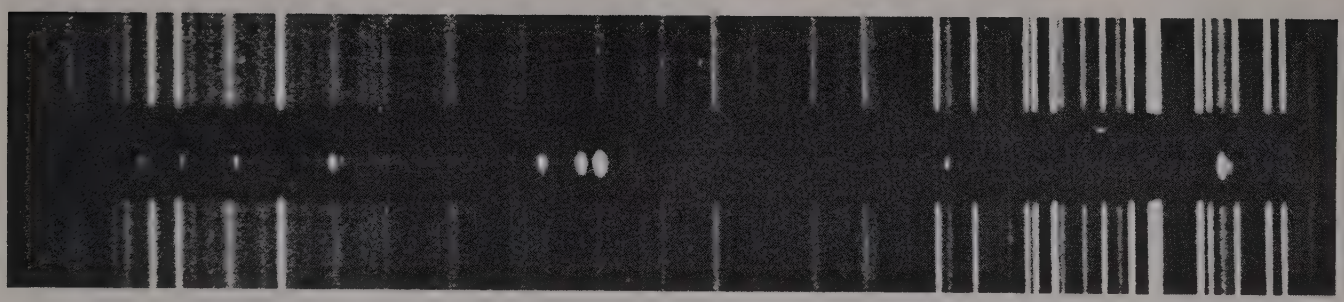
Planche II - a) NGC 2392 - b) NGC 6210 - Spectres pris avec la chambre I du grand spectrographe placé au foyer coudé du télescope de 193 cm.



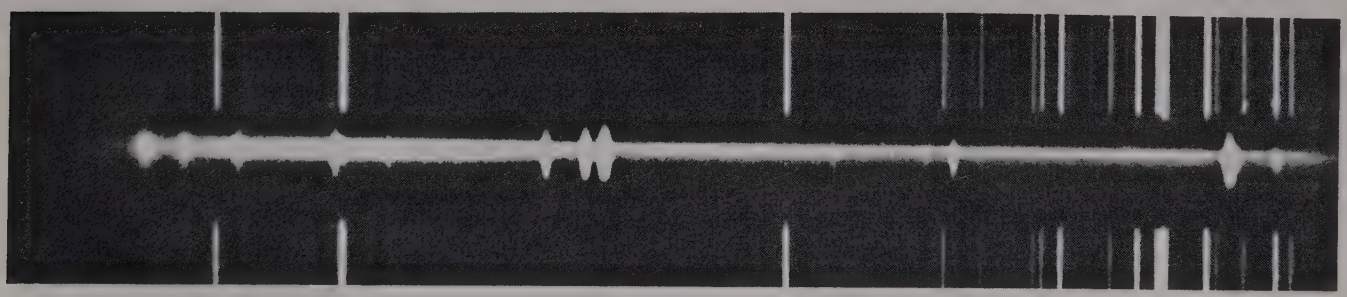
(a)



(b)

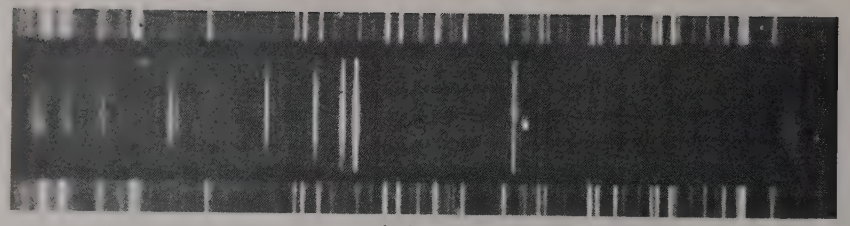


(c)

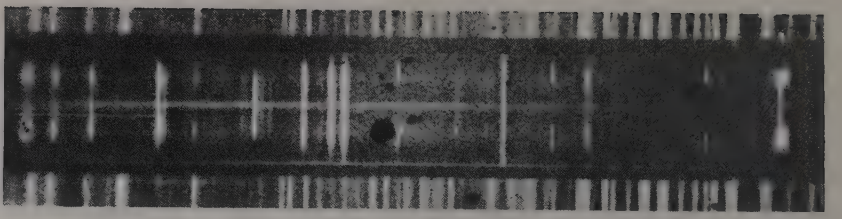


(d)

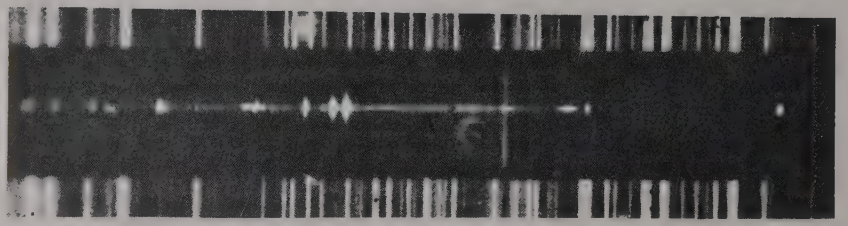
Planche III - a) NGC 6058 - b) IC II 4593 - c) NGC 6879 - d) NGC 6891 - Spectres pris avec le spectrographe E placé au foyer Newton du télescope de 120 cm.



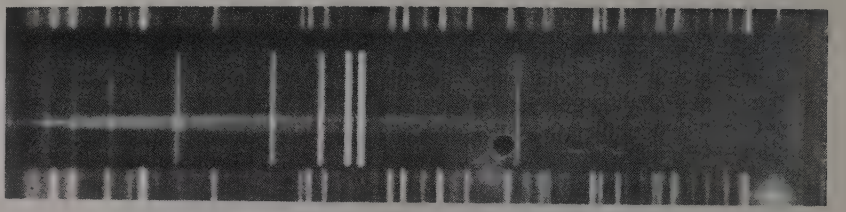
(a)



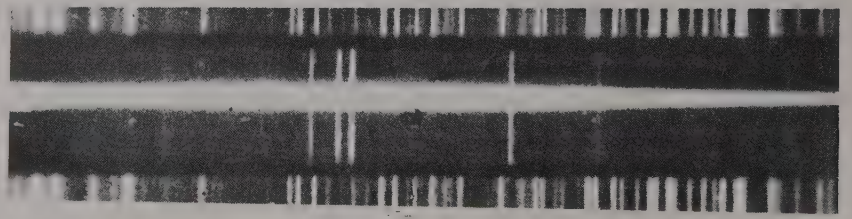
(e)



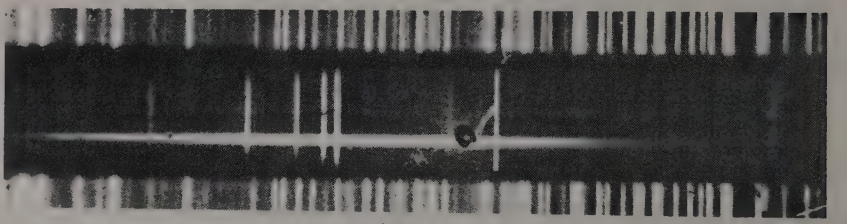
(b)



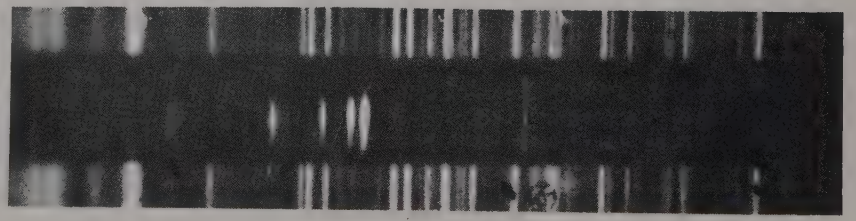
(f)



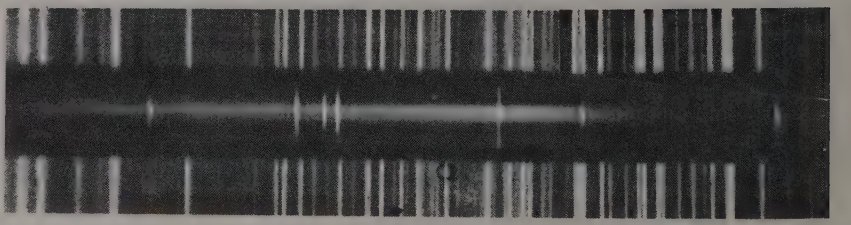
(c)



(g)



(d)



(h)

Planche IV - a) NGC 650-1 - b) IC II 1747 - c) NGC 1514 - d) NGC 2371-2 - e) NGC 6720 - f) NGC 6853 - g) NGC 7008 - h) IC 1470 - Spectres pris avec la caméra électronique placée derrière le spectrographe E (durées d'exposition = 30 minutes).

CONCLUSION

La mise en oeuvre de la caméra électronique nous a posé des problèmes techniques nouveaux. Avec les conditions instrumentales imposées pour ce travail, nous avons été amené à en résoudre deux essentiels.

Nous avons exposé :

1) Un procédé de réduction des mesures de position faites sur les clichés, pour obtenir les vitesses radiales des nébuleuses observées ;

2) Un moyen d'obtenir, par des mesures spectrophotométriques, les intensités relatives des raies nébulaires sur un grand intervalle de longueur d'onde.

La comparaison de quelques-uns des résultats avec ceux d'autres auteurs a justifié pleinement ces méthodes.

La résolution de ces problèmes nous a alors permis d'utiliser au maximum des spectrogrammes de nébuleuses planétaires. Du point de vue qualitatif, de nombreuses raies nébulaires ou nucléaires ont été ajoutées à celles déjà observées, ce qui a rendu possible une meilleure classification des noyaux. Du point de vue quantitatif, nous avons atteint un double but :

1) Préciser les grandeurs des vitesses radiales de plusieurs nébuleuses et ajouter quelques valeurs nouvelles ;

2) Evaluer des intensités de raies et en déduire, outre les coefficients d'absorption interstellaire relatifs aux nébuleuses étudiées, des températures électroniques pour quelques-unes d'entre elles et des rapports d'abondance helium-hydrogène pour toutes. Ces derniers nous ont conduit à un diagramme mettant en évidence une relation entre la proportion d'helium ionisé des nébuleuses à haute excitation et la différence des magnitudes entre l'étoile centrale et la nébuleuse.

En terminant, je tiens à remercier :

Monsieur Dufay, Directeur des Observatoires de Lyon et de Haute-Provence, qui m'a toujours accueillie très favorablement dans son établissement ;

Monsieur Sémirot, Directeur de l'Observatoire de Bordeaux qui m'a constamment encouragée dans mon travail et l'a facilité dans tous les domaines ;

Toute ma gratitude va à Monsieur Lallemand, Astronome titulaire de l'Observatoire de Paris et à Monsieur Fehrenbach, Directeur de l'Observatoire de Marseille et Directeur-adjoint de l'Observatoire de Haute-Provence, pour la possibilité qu'ils m'ont donnée d'expérimenter et d'utiliser cette technique nouvelle, pour l'aide qu'ils ont apportée à l'Equipe tant en personnel qualifié qu'en matériel, et pour leurs conseils.

J'exprime ma sincère reconnaissance à mes co-équipiers Monsieur et Madame Robert Duflot, de l'Observatoire de Marseille, Monsieur José Daguillon, de l'Observatoire de Haute-Provence, sans lesquels ce travail n'aurait pu être mené à bien. A tous les techniciens de cet Observatoire, que j'ai si souvent mis à contribution, je dis un amical merci.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Ch. FEHRENBACH - J. Obs. 43, 85, 1960.

[2] P. VERNIER - Bull. Astr. Obs. Paris, 22, 83, 1959.

[3] DREYER - New general catalogue, Mem. Royal Astr. Soc. 49, 1, 1888.
Index catalogue, id. 51, 1, 1894.
Second Index catalogue, id. 59, 106, 1908.

[4] BECVAR - Atlas coeli Skalnate Pleso II, Prague 1951.

[5] W. WRIGHT - Publ. Lick Obs. 13, 193, 1918.

[6] K. WURM - Die planetarischen nebel, Berlin 1951.

[7] P. SWINGS - Ann. Astrophysique, 15, 290, 1952.

[8] R. MINKOWSKI - Ap. J. 95, 243, 1942.

[9] M. CHOPINET - C.R. Ac. Sc. 253, 2642, 1961.

[10] BEALS - Trans. I.A.U. 6, 252, 1938.

[11] PAYNE - Harvard Obs. Monographs n° 3, 71, 1930.

[12] D.B. McLAUGHLIN - P.A.S.P. 54, 31, 1942.

[13] Y. et H. ANDRILLAT - Ann. Astrophysique, 24, 139, 1961.

[14] L. ALLER et O. WILSON - Ap. J. 119, 243, 1954.

[15] M.L. WHITE - Ap. J. 115, 71, 1952.

[16] L. ALLER - Ap. J. 108, 462, 1948.

[17] STOY - Lick Obs. Bull. 17, 179, 1935.

[18] L. ALLER - Ap. J. 113, 125, 1951.

[19] BOWEN - Ap. J. 81, 4, 1935.

[20] Trans. I.A.U. 5, 85, 1935.

[21] R. WILSON - Catalogue of stellar radial velocities, Washington 1953.

[22] M. CHOPINET - C.R. Ac. Sc. 254, 3973, 1962.

[23] W. CAMPBELL et J. MOORE - Publ. Lick Obs. 13, 77, 1918.

[24] O'DELL - Ap. J. 135, 371, 1962.

[25] VORONTSOV-VELYAMINOV - Les nébuleuses gazeuses et les novae, Moscou 1948.

[26] D. BARBIER - Ann. Astrophysique 7, 84, 1944.

[27] D. CHALONGE - Ann. Astrophysique 15, 201, 1952.

[28] H. ANDRILLAT - Ann. Astrophysique Suppl. 1, 1955.

[29] BECKER et KIPPHAN - Ann. Physique 10, 15, 1931.

[30] P. MIANES - Ann. Astrophysique (sous presse).

[31] J. DUFAY - Ann. Géophysique 11, 387, 1955.

[32] A. E. WHITFORD - A. J. 63, 201, 1958.

[33] L. DIVAN - Ann. Astrophysique 17, 456, 1954.

[34] MENZEL et BAKER - Ap. J. 88, 52, 1938.

[35] GARSTRANG - M. N. 111, 113, 1951.

[36] AMBARTSUMIAN - Theoritical astrophysics, Londres 1958.

[37] SEATON - M. N. 120, 330, 1960.

[38] L. ALLER - Ap. J. 93, 236, 1941.

[39] WYSE - Ap. J. 95, 356, 1942.

[40] L. ALLER, BOWEN, R. MINKOWSKI - Ap. J. 122, 62, 1959.

[41] L. ALLER et R. MINKOWSKI - Ap. J. 124, 93, 1956.

[42] ZANSTRA - Publ. Dom. Astrophysical Obs. 4, 209, 1931.

[43] AMBARTSUMIAN - Poulkovo Obs. Circ. n° 4, 1932.

[44] ALLEN - Astrophysical quantities, London, 1955.

Observatoire de Bordeaux
Observatoire de Haute-Provence.

Deuxième thèse

Propositions données par la Faculté

Les limites de la spectographie stellaire ; les faibles dispersions

Vu et approuvé
Bordeaux, le 13 février 1963
Pour le Doyen
l'Assesseur
R. CALAS

Vu et permis d'imprimer
Bordeaux, le 20 février 1963
le Recteur
J. BABIN

IMP. LOUIS-JEAN – GAP
Dépôt légal no 137 – 1963